

Titre: Étude et caractérisation des phénomènes d'éclatement et
Title: d'explosion des pneus de camion.

Auteur: Lionel Michel
Author:

Date: 2010

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Michel, L. (2010). Étude et caractérisation des phénomènes d'éclatement et
Citation: d'explosion des pneus de camion. [Master's thesis, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/420/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/420/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Aurelian Vadean, & René Benoît
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DES PHÉNOMÈNES D'ÉCLATEMENT ET
D'EXPLOSION DES PNEUS DE CAMION

LIONEL MICHEL

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)

NOVEMBRE 2010

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE ET CARACTÉRISATION DES PHÉNOMÈNES D'ÉCLATEMENT ET
D'EXPLOSION DES PNEUS DE CAMION

présenté par : MICHEL Lionel

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LAKIS Aouni A., Ph.D., président

M. VADEAN Aurelian, Doct., membre et directeur de recherche

M. BENOIT René, M.Sc.A., membre et codirecteur de recherche

M. GOU Michel, M.Sc.A., membre

DÉDICACE

À mes parents, ma sœur et Tiana

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier en premier lieu mon directeur de recherche Aurelian Vadean pour sa confiance, son soutien et la disponibilité dont il a su faire preuve tout au long de mes activités de recherche.

Je remercie M. Aouni A. Lakis et M. Michel Gou, professeurs à l'École Polytechnique de Montréal pour avoir accepté de faire partie du jury d'évaluation de ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble des membres de l'équipe de recherche responsable du projet. Je pense en particulier à René Benoît, Christian Sirard et Christian Larue de l'Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail de Montréal mais aussi à Patricia Dolez de l'École de Technologie Supérieure de Montréal et Olivier Bellavigna-Ladoux du groupe d'expertise Prolad. Tous ont su faire preuve d'un véritable professionnalisme pour mener à bien ce projet.

Merci à Charles-Étienne Caron, Jean-Pierre Roux, Jean-Baptiste Mouillet et David Kirby de la compagnie Altair Engineering pour leur aide indispensable. L'utilisation avancée du logiciel Radioss n'aurait pas pu être possible sans leur expertise et leurs précieux conseils.

Merci aussi à Musandji Fuamba du département des génies civil, géologique et des mines de l'École Polytechnique de Montréal et Éric Duschênes du laboratoire (CM)² pour la réalisation du test hydrostatique et des analyses microscopiques.

Je ne peux oublier de remercier mes collègues de travail, notamment Guillaume Biron et José Noël Ndzeno-Fotso. Nos différents échanges ont rendu cette expérience très enrichissante aussi bien d'un point de vue professionnel que personnel.

Enfin, merci à ma famille pour leur soutien et leurs encouragements

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce projet, merci.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente les résultats des activités de recherche sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus de véhicules lourds. Réalisé conjointement par l'Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST) de Montréal et l'École Polytechnique de Montréal, il permet une mise à jour des connaissances sur ces deux types d'évènements, explique leurs causes et leurs conséquences et présente des résultats pertinents pour l'évaluation du risque.

Les résultats qui sont présentés ici reposent à la fois sur des essais expérimentaux et des analyses numériques utilisant la méthode des éléments finis. Un essai d'explosion a été mené au Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs (LCRE) à Ottawa, Canada pour caractériser le phénomène d'explosion. Le phénomène d'éclatement par surpression, qui est un cas particulier d'éclatement, a été étudié à l'aide d'un test d'éclatement hydrostatique et d'analyses microscopiques. Les analyses numériques ont été réalisées avec le logiciel Altair Radioss pour compléter et/ou valider les résultats de ces essais.

Les éclatements et explosions de pneus, bien que relativement rares, sont très dangereux du fait de leur imprévisibilité. Ils interviennent la plupart du temps lors de la réparation, de l'entretien ou encore du remplacement des roues du véhicule.

La cause la plus commune des phénomènes d'éclatement ou d'explosion de pneu est un apport de chaleur au système pneu-jante. Cet apport de chaleur déclenche des réactions chimiques qui dégradent le caoutchouc des pneus produisant alors des gaz et des matières inflammables. Il s'agit principalement des réactions de pyrolyse, thermo-oxydation et de combustion. En s'ajoutant au phénomène d'expansion thermique et à la diminution des propriétés mécaniques du pneu par divers facteurs, les gaz produits contribuent à l'augmentation de la pression dans le pneu et augmentent ainsi le risque d'éclatement ou d'explosion.

A l'aide des données retrouvées dans la littérature et celles de l'analyse numérique, le scénario menant à l'explosion d'un pneu a pu être établi. Une telle explosion survient lorsque les trois conditions critiques de concentration et de température des matières inflammables et de concentration en oxygène sont simultanément réunies. L'onde de pression résultant du mélange

explosif se déplace circonférentiellement dans deux directions à partir du point d'initiation. Les deux fronts d'onde se rencontrent au point diamétralement opposé au point d'initiation et la rencontre des deux fronts d'onde provoque la rupture du pneumatique au niveau des deux flancs. La rupture des flancs provoque alors un incroyable déplacement d'air à très grande vitesse à l'extérieur du pneu et s'accompagne de la projection de fragments.

L'éclatement de pneu par surpression, quant à lui, survient lorsque le pneu est gonflé bien au-delà de la pression nominale recommandée. Les calculs numériques et un essai destructif de gonflage hydrostatique ont par exemple permis d'établir un facteur de sécurité de l'ordre de 2,5 pour un pneu neuf de taille 11R22.5.

Afin de déterminer les limites de rupture en pression d'un pneu et le scénario conduisant à l'éclatement d'un pneu par surpression, un essai hydrostatique d'éclatement ainsi qu'une inspection aux rayons X du pneu éclaté ont été réalisés. De plus, un modèle numérique de pneu utilisant la méthode des éléments finis a été développé dans le but de calculer numériquement la pression d'éclatement. En définissant dans le modèle éléments finis la pression d'éclatement comme la pression à laquelle la déformation plastique maximale des tringles est atteinte, il a été possible de déterminer une pression d'éclatement très proche de celle observée expérimentalement. Les essais expérimentaux et l'analyse numérique ont permis de comprendre pourquoi, où, quand et comment un pneu éclate lorsqu'il est sur gonflé.

En pratique, la pression exercée entraîne la plupart du temps une rupture au niveau de la tringle située du côté opposé au disque de la jante. La rupture se manifeste plus exactement à un point de chevauchement des brins d'acier de ladite tringle. L'énergie libérée lors de l'éclatement est alors susceptible de tuer une personne se trouvant à proximité du pneu.

ABSTRACT

This thesis presents the results of research activities on heavy vehicles tire blowout and explosion phenomena. Produced jointly by the *Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail* (IRSST) in Montreal, Canada and *École Polytechnique de Montréal*, it allows an update of knowledge on these two kinds of events, explains their causes and their consequences and presents relevant results to risk assessment.

The results presented in this thesis are based on both experimental tests and numerical analyses using the finite element method. An explosion test was performed in the *Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs* (LCRE) in Ottawa, Canada to provide relevant scientific data for a better understanding of the tire failure mechanism in the case of explosion.

Tire blowouts include the tire burst due to over-pressurization. The latter has been studied using a hydrostatic burst test and microscopic analyses. A numerical analysis was conducted using the Altair Radioss software to complete and/or validate the results of these tests.

Even though relatively rare, tire blowouts and explosions are very dangerous because of their unpredictability. They usually occur during the repair, maintenance or replacement of wheels of the vehicle.

A heat input to the tire-rim assembly is the main contributor to the final blowout or explosion event. The heat input generates chemical reactions which degrade tire rubber and produce flammable gases. Three types of thermo-chemical reactions have been identified as potential sources. They are pyrolysis, thermo-oxidation and combustion. The gases these reactions produce add to the increase in pressure inside the tire due to thermal expansion of the air and, consequently, the risk of blowout or explosion.

Information gathered in the literature and numerical simulation results allowed to propose a scenario for an explosion.

Such an explosion occurs if the three critical conditions of concentration, temperature of flammable gas and oxygen concentration occur simultaneously. The two wavefronts produced by

the explosion meet at the point diagonally opposite to the point of initiation. Their meeting is responsible for the rupture of the tire in the sidewall area. The rupture of the tire causes an important air movement at high speed outside of the tire and the projection of fragments.

The phenomenon of tire burst due to over-pressurization occurs when the latter is inflated well beyond the pressure recommended by the manufacturer. For instance, the safety factor for a 11R22.5 new truck tire is about 2.5.

In order to determine the strength limits of a tire and describe the tire burst phenomenon, a hydrostatic burst test and a X-ray inspection of the burst tire were conducted. In the mean time, a finite element analysis was also conducted to determine the inflation pressure resulting in failure of a new tire. The model was able to well predict the tire burst pressure by identifying the pressure at which the maximal plastic strain of steel bead wires is reached. The various tests and finite element analysis allowed to understand why, where, when and how a tire fails when over pressurized.

The bead at the opposite flange side is almost always at origin of the failure. The break of the bead is located at of one the two overlap points. The energy released during a tire burst can propel the tire and kill people near the tire.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
TABLE DES MATIÈRES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES.....	XXII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 LES PNEUS DE CAMION.....	3
1.1 Généralités sur les pneumatiques	3
1.1.1 Pneus de type radial et diagonal.....	3
1.1.2 Marché du pneumatique [3, 4]	3
1.2 Architecture d'un pneu radial.....	5
1.2.1 Composants d'un pneu radial.....	5
1.2.2 Marquage et choix d'un pneu.....	7
1.3 Matériaux constitutifs d'un pneu.....	9
CHAPITRE 2 LES PHÉNOMÈNES D'ÉCLATEMENT ET D'EXPLOSION DE PNEUS..	13
2.1 Définitions des phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneu.....	13
2.2 Cas d'accidents recensés dans la littérature	14
2.2.1 Accidents survenus au Québec.....	14
2.2.2 Accidents survenus hors du Québec.....	17

2.3	Conséquences des phénomènes sur la santé.....	18
2.4	Mécanismes des phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus	19
2.4.1	Éclatement d'origine mécanique.....	20
2.4.2	Éclatement ou explosion d'origine chimique.....	21
2.4.3	Considérations sur le phénomène d'explosion.....	26
2.5	Processus général menant à l'explosion d'un pneu.....	27
2.6	Délais de réaction	31
2.7	Analyse détaillée d'essais expérimentaux.....	32
2.7.1	Expérience réalisée par Michelin États-Unis	32
2.7.2	Rapport ACARP « Tyre fires and explosions of earthmover tyres » [48]	35
CHAPITRE 3	MODÉLISATION D'UN PNEU PAR ÉLÉMENTS FINIS.....	37
3.1	Modèle numérique.....	37
3.2	Propriétés des différents composants d'un pneu	39
3.2.1	Jante.....	39
3.2.2	Tringles.....	40
3.2.3	Caoutchouc.....	41
3.2.4	Renforts	44
3.2.5	Synthèse sur les propriétés mécaniques	50
3.2.6	Propriétés des éléments	52
3.3	Interfaces	53
3.3.1	Interface pneu / jante	53
3.3.2	Interfaces pneu / tringles et pneu / nappes	53
3.4	Conditions limites et chargement appliqué	54
3.4.1	Conditions limites	54

3.4.2	Pression	54
CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DU PHÉNOMÈNE D'EXPLOSION DE PNEU		56
4.1	Généralités sur le phénomène d'explosion.....	56
4.2	Simulation d'une explosion de pneu par la méthode des éléments finis.....	57
4.2.1	Description du modèle	57
4.2.2	Schéma explicite	60
4.2.3	Formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)	60
4.2.4	Paramètres de simulation	61
4.2.5	Résultats de la simulation d'explosion.....	67
4.2.6	Mécanismes de rupture du pneumatique.....	74
4.2.7	Considérations sur la simulation d'explosion par la méthode des éléments finis	75
4.2.8	Essai préliminaire en chambre d'explosion	76
4.3	Essai d'explosion de pneus au LCRE	78
4.3.1	Montage expérimental.....	78
4.3.2	Résultats des essais d'explosion réalisés au LCRE.....	81
4.4	Conclusion sur le phénomène d'explosion de pneu	87
CHAPITRE 5 ÉCLATEMENT D'UN PNEUMATIQUE PAR SURPRESSION.....		90
5.1	Le phénomène d'éclatement par surpression	90
5.1.1	Pressions d'éclatement	91
5.1.2	Modes de rupture.....	92
5.2	Essai hydrostatique d'éclatement par surpression.....	93
5.2.1	Description de l'essai expérimental	93
5.2.2	Mesure de la pression d'éclatement	94
5.2.3	Rupture du pneumatique	95

5.3	Simulation d'un éclatement par surpression par la méthode des éléments finis.....	99
5.3.1	Résultats de simulations retrouvés dans la littérature	99
5.3.2	Simulation d'un éclatement par surpression par la méthode des éléments finis	100
5.3.3	Résultats de la simulation par la méthode des éléments finis	101
5.4	Conclusion sur le phénomène d'éclatement par surpression	105
CONCLUSION		106
LISTE DE RÉFÉRENCES.....		109
ANNEXES		116

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 Professions touchées par les éclatements et les explosions de pneu.....	15
Tableau 2-2 Secteurs touchés par les éclatements et les explosions de pneu	16
Tableau 3-1 Propriétés mécaniques de l'aluminium.....	39
Tableau 3-2 Propriétés mécaniques de l'acier des tringles et de la jante.....	41
Tableau 3-3 Paramètres de la loi de Mooney-Rivlin pour le caoutchouc	43
Tableau 3-4 Propriétés mécaniques du caoutchouc et d'un câble d'acier utilisées dans la loi des mélanges.....	47
Tableau 3-5 Comparaison des valeurs théorique et expérimentale des propriétés mécaniques d'une couche élémentaire	48
Tableau 3-6 Propriétés mécaniques équivalentes des nappes de sommet.....	49
Tableau 3-7 Propriétés mécaniques du polyester et du nylon.....	49
Tableau 3-8 Propriétés mécaniques des nappes carcasse et de sommet	50
Tableau 3-9 Propriétés mécaniques des différents composants d'un pneu.....	51
Tableau 3-10 Propriétés du maillage de la roue.....	52
Tableau 4-1 Propriétés, nombre et type d'éléments utilisés pour le maillage	60
Tableau 4-2 Paramètres utilisés dans l'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee	62
Tableau 4-3 Paramètres de l'air	64
Tableau 4-4 Paramètres de l'interface 18	66
Tableau 5-1 Comparaison des pressions moyennes d'éclatement de pneus neufs et usagés.....	91
Tableau 5-2 Pressions d'éclatement.....	92

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Répartition géographique du marché du pneumatique pour les poids lourds	4
Figure 1-2 Architecture d'un pneu radial de camion	5
Figure 1-3 Marquage d'un pneu [1]	7
Figure 1-4 Choix du pneumatique selon l'essieu	9
Figure 1-5 Les polymères du pneu	10
Figure 2-1 Explosion de pneu survenue à la mine Radomiro au Chili en 2000	17
Figure 2-2 Nombre cumulé de décès causés par l'éclatement ou l'explosion d'un pneu entre 1990 et 2004 au Québec	18
Figure 2-3 Exemple de rupture éclair	20
Figure 2-4 Mécanismes du phénomène d'explosion [7]	29
Figure 2-5 Séquence possible des événements lors de la surchauffe d'un pneu de camion	30
Figure 2-6 Essai d'explosion par soudure sur la jante	33
Figure 2-7 Variation de la température et de la pression internes d'un pneu en fonction du temps lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante [7]	34
Figure 2-8 Variation de la température en fonction de la pression interne d'un pneu lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante [7]	34
Figure 2-9 Apport de chaleur interne	35
Figure 2-10 Apport de chaleur externe	35
Figure 3-1 Modèle du pneu de taille 11R22.5	38
Figure 3-2 Section du pneu mettant en évidence les différents composants du pneu	38
Figure 3-3 Jante de camion en aluminium	39
Figure 3-4 Courbe contrainte - déformation de l'acier à haute résistance	41
Figure 3-5 De gauche à droite: modèle caoutchouc renforcé, modèle « <i>rebar layer</i> », modèle composite stratifié et modèle en treillis	44

Figure 3-7 Éléments <i>rebar</i> permettant de simuler les cordes de renforcement dans le caoutchouc	45
Figure 3-6 Description de l'orientation d'une simple couche <i>rebar</i>	45
Figure 3-8 Modélisation des renforts sous formes de coques orthotropes	46
Figure 3-9 Constitution des nappes de sommet [1]	46
Figure 3-10 Conditions limites et chargement appliqué	55
Figure 4-1 Description du phénomène d'onde de choc	56
Figure 4-2 Description du modèle	58
Figure 4-3 Maillage de l'air	59
Figure 4-4 Maillage de la charge explosive	59
Figure 4-5 Détail du maillage de l'air à proximité de la charge explosive	59
Figure 4-6 Maillage de l'air intérieur	59
Figure 4-7 Formulations eulérienne (a), lagrangienne (b) et ALE (c)	61
Figure 4-8 Principe de l'interface 18	65
Figure 4-9 Modèle de rupture par déformation maximale	66
Figure 4-10 Identification de certains nœuds et axes du modèle	67
Figure 4-11 Plans de symétrie du modèle	67
Figure 4-12 Rupture du pneu par la méthode des éléments finis	68
Figure 4-13 Rupture du pneu lors de l'accident survenu à la mine Radomiro Tomic	68
Figure 4-14 Vitesse et direction des fragments à $t = 5$ ms	69
Figure 4-15 Propagation de l'onde de choc dans les plans xy (haut) et yz (bas)	70
Figure 4-16 Évolution temporelle de la pression de l'air extérieur aux nœuds 1, 4 et 7	71
Figure 4-17 Évolution temporelle de la pression de l'air extérieur aux nœuds 7, 8 et 9	72
Figure 4-18 Évolution temporelle de la vitesse de l'air extérieur aux nœuds 1, 4 et 7	73
Figure 4-19 Évolution temporelle de la vitesse de l'air extérieur aux nœuds 7, 8 et 9	74

Figure 4-20 Scénario conduisant à la rupture du pneu.....	75
Figure 4-21 Le pneu, dans sa position verticale, est fixé à un support	77
Figure 4-22 Chambre d'explosion du LCRE	77
Figure 4-23 Pneu après l'explosion	77
Figure 4-24 Schéma du montage expérimental utilisé au LCRE	78
Figure 4-25 Montage expérimental utilisé au LCRE lors des essais d'explosion.....	80
Figure 4-26 Ruptures des pneus après les essais d'explosion	81
Figure 4-27 Évolution de la température à l'intérieur des 3 pneus.....	82
Figure 4-28 Évolution de la pression à l'intérieur de chacun des trois pneus	83
Figure 4-29 Canisters pour l'échantillonnage des gaz.....	85
Figure 4-30 Températures de l'air, du talon et du flanc, périodes d'échantillonnage du FTIR et concentration des gaz à l'intérieur du pneu 1	86
Figure 5-1 Distribution des charges (en lbs) dans la tringle à 300 psi (charge maximale = 310 lbs)	93
Figure 5-2 Schéma du montage expérimental utilisé lors du test hydrostatique.....	94
Figure 5-3 Montée en pression du pneu lors du test hydrostatique.....	95
Figure 5-4 Rupture du pneumatique lors du test hydrostatique	96
Figure 5-5 Micrographies réalisées au MEB du faciès de rupture d'un brin de la tringle ayant subi la rupture lors de l'essai hydrostatique qui permettent d'observer la diminution de section .	97
Figure 5-6 Micrographies réalisées à différents grossissements au MEB du faciès de rupture d'un brin de la tringle ayant subi la rupture lors de l'essai hydrostatique	97
Figure 5-7 Montage utilisé pour l'inspection du pneu aux rayons X	98
Figure 5-8 Radiographie de la tringle	98
Figure 5-9 Changement de section de la tringle au point de rupture	99
Figure 5-10 Zone de rupture observée aux rayons X	99

Figure 5-11 Pression imposée au pneu.....	100
Figure 5-12 Contrainte maximale de Von Mises dans les tringles en fonction de la pression	101
Figure 5-13 Déformation plastique maximale dans les tringles en fonction de la pression.....	102
Figure 5-14 Distribution des contraintes (en GPa) et des déformations plastiques dans la tringle à 1,888 MPa (273,83 psi) et déplacement de celle-ci au cours du gonflage	103

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ALE	Arbitrary Lagrangian Eulerian
ASTE	Association Sectorielle Transport Entreposage
CCDP	Classification Canadienne Descriptive des Professions
CAEQ	Classification des Activités Économiques du Québec
CH ₃ CH ₂ CHO	Propionaldéhyde
CH ₄	Méthane
C ₃ H ₄ O	Acroléine
C ₃ H ₆	Propène (ou propylene)
C ₃ H ₈	Propane
C ₅ H ₁₀	Pentène
C ₅ H ₁₂	Pentane
C ₆ H ₁₄	Hexane
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COMPSH	Matériau utilisé pour coques orthotropes dans Altair Radioss
CSST	Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail
CPU	Central Processing Unit
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
H	Hydrogène
INTER	Interface dans Altair Radioss
JWL	Jones – Wilkins - Lee
LCRE	Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs
LIE	Limite inférieure d'explosivité

LSE	Limite supérieure d'explosivité
IRSST	Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail
MEF	Méthode des éléments finis
NO	Monoxyde d'azote
NO ₂	Dioxyde d'azote
NR	Caoutchouc naturel
SBR	Caoutchouc styrène butadiène
SH_ORTH	Propriété utilisée pour les coques orthotropes dans Altair Radioss
SOLID	Propriété utilisée pour les éléments solides dans Altair Radioss
SO ₂	Dioxyde de soufre
TNT	Trinitrotoluène
Φ_r	Fraction volumique du caoutchouc
Φ_c	Fraction volumique des câbles
ρ	Masse volumique
E	Module de Young (matériau isotrope)
E_r	Module de Young du caoutchouc
E_f	Module de Young des fibres
ν	Coefficient de Poisson
G	Module de cisaillement
λ	Allongement
ε	Déformation
$\dot{\varepsilon}$	Taux de déformation
ε_{\max}	Déformation maximale (composantes élastique et plastique)
$\varepsilon_{p \max}$	Déformation plastique maximale

σ_{\max}	Contrainte maximale
σ_e	Limite élastique
b	Module tangent dans la loi de Johnson-Cook
n	Exposant dans la loi de Johnson - Cook
E_{11}, E_L	Module de Young dans la direction longitudinale des fibres
E_{22}, E_T	Module de Young dans la direction transversale des fibres
G_{12}, G_{LT}	Module de cisaillement d'un composite unidirectionnel
E_{xx}	Module de Young dans la direction du chargement
E_{yy}	Module de Young dans la direction perpendiculaire au chargement
ν_{12}, ν_{LT}	Coefficient de Poisson majeur
ν_{21}, ν_{TL}	Coefficient de Poisson mineur
N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}	Forces par unité de largeur dans un stratifié
M_{xx}, M_{yy}, M_{xy}	Moments par unité de largeur dans un stratifié
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$	Composantes du tenseur de contrainte dans un repère cartésien (plan x-y)
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$	Composantes du tenseur de déformation dans un repère cartésien (plan x-y)
$\varepsilon_{xx}^0, \varepsilon_{yy}^0$	Déformations normales du plan médian d'un stratifié
γ_{xy}^0	Distorsion du plan médian d'un stratifié
k_{xx}, k_{yy}	Courbures de flexion d'un stratifié
k_{xy}	Courbure de torsion d'un stratifié
z	Distance au plan médian dans la direction de l'épaisseur d'un stratifié
μ_1, μ_2	Paramètres de la loi d'Ogden dépendant du matériau
α_1, α_2	Paramètres de la loi d'Ogden dépendant du matériau
λ	Conductivité thermique
γ	Constante des gaz parfaits

ω	Paramètre de la loi de Jones - Wilkins - Lee
A	Paramètre de la loi de Jones - Wilkins - Lee
B	Paramètre de la loi de Jones - Wilkins - Lee
$C_{0,...,5}$	Coefficients de la loi hydrodynamique
c	Vitesse du son
E_0	Énergie spécifique
I_i	Invariant i
l_c	Longueur caractéristique d'un élément
p	Pression
p_0	Pression initiale
p_c	Pression de crête
p_{CJ}	Pression de Chapman - Jouguet
Δp	Niveau de surpression
$\Delta p/\Delta t$	Impulsion
R_1, R_2	Paramètres de la loi de Jones - Wilkins - Lee
S_{el}	Surface d'un élément
$S_{t\text{ fac}}$	Facteur de rigidité
Δt	Durée de la montée à la pression de l'onde de crête
T	Durée de l'onde de surpression
T^*	Paramètre de la loi de Johnson - Cook
V_d	Vitesse de détonation
V	Volume spécifique
W	Énergie de déformation

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 – Indices de charge et de vitesse d’un pneu.....	116
ANNEXE 2 – Accidents du travail causés par une explosion ou un éclatement de pneu survenus au Québec entre 1990 et 2004.....	117
ANNEXE 3 – Mécanique des composites [86].....	119
ANNEXE 4 – Calcul des propriétés mécaniques d’un stratifié	124
ANNEXE 5 – Schémas explicite et implicite	131

INTRODUCTION

En moyenne au Québec, Canada, l'éclatement et l'explosion d'un pneu de véhicule lourd sont responsables de deux accidents mortels tous les trois ans. Si les accidents sont relativement peu nombreux, ils sont la plupart du temps mortels. Des dispositifs de surveillance des pneus en fonctionnement existent mais aucun d'entre eux n'est capable à ce jour de répondre efficacement aux besoins de détection et d'alerte vis-à-vis des phénomènes d'explosion ou d'éclatement.

Si l'objectif principal de cette étude reste de détecter et prévenir les risques d'éclatement ou d'explosion de pneus de véhicules lourds, les travaux de recherche présentés dans ce mémoire visent aussi et surtout à fournir des données scientifiques nécessaires à la compréhension et à la description des processus conduisant à l'un ou l'autre des phénomènes. Ces résultats devraient permettre de sensibiliser le plus grand nombre aux dangers et risques d'éclatement ou d'explosion de pneu mais aussi, de développer des outils de prévention et des moyens de protection pour réduire les risques de blessures graves et d'accidents mortels.

Lors de cette étude, des simulations numériques et des essais expérimentaux ont été menés en collaboration avec l'École Polytechnique de Montréal et l'Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST) de Montréal. La démarche adoptée consiste en la réalisation de deux types d'essais destructifs, le premier en laboratoire et l'autre en condition réelle avec un camion sur piste. Ce deuxième cas n'est toutefois pas présenté dans ce mémoire puisqu'il ne devrait avoir lieu qu'à partir de l'année 2011. Les simulations numériques viennent quant-à elles en complément de ces essais et représentent une alternative à de coûteux essais.

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des pneus de camion comme préalable nécessaire à la compréhension des phénomènes étudiés dans ce mémoire. Des informations relatives au marché du pneumatique, aux composants et matériaux constituant un pneu de camion à architecture radiale y sont détaillées.

Le deuxième chapitre présente une revue des connaissances retrouvées dans la littérature sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneu. Des cas d'accidents et leurs conséquences sur la santé illustrent l'importance des deux phénomènes. Les informations pertinentes sur

l'éclatement d'origine mécanique ainsi que l'éclatement ou l'explosion d'origine chimique sont également rassemblées dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente la méthodologie permettant de modéliser un pneumatique par la méthode des éléments finis avec le logiciel Altair Radioss. Outre les techniques de modélisation d'un pneumatique par éléments finis, on y trouve également des informations sur les matériaux constitutifs d'un pneu et les propriétés des différents composants d'un pneu. Le chapitre se termine par une synthèse des propriétés mécaniques des matériaux.

Le chapitre 4 traite du phénomène d'explosion à travers des simulations numériques et des essais expérimentaux réalisés au Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs (LCRE) à Ottawa, Canada. Afin de comprendre et prédire le comportement du pneu lors d'une explosion, le phénomène a été simulé à l'aide d'un logiciel d'éléments finis utilisant un schéma explicite. Le principe de la simulation repose sur la modélisation d'une charge explosive à l'intérieur du pneu créant une onde de choc. La modélisation par éléments finis permet par exemple de déterminer le mode de propagation de l'onde de choc résultant de l'explosion ou encore, la variation de la pression à proximité du pneu et la vitesse de projection des débris. D'un point de vue sécuritaire, ces informations sont d'une importance capitale. Enfin, les essais expérimentaux visant à reproduire une explosion sur le site sécuritaire du LCRE sont également présentés.

Le chapitre 5 est consacré exclusivement au phénomène d'éclatement par surpression, c'est-à-dire lorsque le pneu est gonflé au-delà des pressions recommandées par le fabricant. Il confronte les résultats de simulations numériques et d'essais expérimentaux. En considérant la déformation plastique maximale des tringles comme condition de rupture du pneu, il a été possible de déterminer la pression d'éclatement par la méthode des éléments finis. Cette pression a pu être comparée à celle mesurée lors d'un essai hydrostatique réalisé au laboratoire de l'École Polytechnique de Montréal. L'ensemble de ces résultats et les informations de la littérature permettent de décrire le scénario à l'origine de l'éclatement par surpression et mettent en évidence le rôle essentiel joué par les tringles. Ce chapitre a fait l'objet d'un article soumis à la publication dans la revue *Tire Science and Technology*.

CHAPITRE 1 LES PNEUS DE CAMION

L'invention de la roue durant l'Âge de Bronze représente l'une des inventions les plus importantes de notre histoire puisqu'elle est à l'origine de la plupart de nos technologies de transports [1]. Si les premiers véhicules équipés de roues apparaissent dès 3500 ans avant J.C, la roue connaît sa dernière véritable révolution en 1846 lorsque Robert William Thomson, âgé seulement de 23 ans, dépose un brevet pour l'invention d'un pneumatique. Il s'agissait en réalité d'un tube gonflé d'air ou plus exactement, d'un tube élastique en toile caoutchoutée entouré d'une enveloppe extérieure en cuir et boulonnée à la roue. Avec les découvertes du procédé de vulcanisation du caoutchouc par Charles Goodyear en 1839 et l'essor industriel du XIX^{ème} siècle, le pneu a subi de nombreuses évolutions et a su gagner au fil du temps tous les moyens de transport.

1.1 Généralités sur les pneumatiques

1.1.1 Pneus de type radial et diagonal

Il existe actuellement deux technologies de pneus, le pneu à architecture diagonale et le pneu à architecture radiale. Si le pneu de type diagonal était le standard dominant des années 20 aux années 60, le pneu de type radial breveté en 1946 par Michelin révolutionna le monde du pneumatique pour devenir le standard d'aujourd'hui. Il est vrai que le pneu de type diagonal a tendance à surchauffer avec la vitesse et a une tenue latérale médiocre (forts glissements latéraux et usure rapide sur routes sinueuses). Le pneu de type radial, lui, permet une surface de contact avec le sol maximum en permanence, un échauffement limité et un confort accru [2]. C'est ce type de pneu que nous considérerons dans ce qui suit.

1.1.2 Marché du pneumatique [3, 4]

1.1.2.1 Marché mondial du pneumatique

En 2007, les pneumatiques (tous secteurs confondus) représentaient un marché de 127 milliards de dollars américains. Si le marché est fortement concurrentiel, les trois principaux manufacturiers Michelin, Bridgestone et Goodyear se partagent à eux trois la moitié du marché

mondial (avec respectivement 17,1%, 16,9% et 14,9% de parts de marché). Le marché mondial du pneumatique a connu une croissance annuelle en valeur de 5,9% sur les 20 dernières années et a triplé en 20 ans. En 2008, on estimait le marché mondial à pas moins de 1,1 milliard de pneumatiques pour les voitures de tourisme et camionnettes et 147 millions de pneumatiques pour les poids lourds!

1.1.2.2 Marché mondial du pneumatique dans le secteur des poids lourds

Actuellement, le transport routier reste largement prioritaire par rapport aux autres modes de transport. Il permet par exemple une plus grande rapidité que le transport ferroviaire ou fluvial. Le marché du pneumatique dans le secteur des poids lourds est en toute logique fortement dépendant des besoins en termes de transport routier. La figure 1-1 indique la répartition géographique du marché du pneumatique dans le secteur des poids lourds. On constate que l'Asie y occupe une place prépondérante grâce au poids croissant de la Chine.

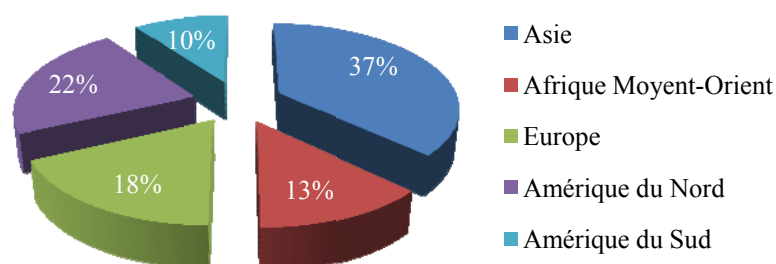


Figure 1-1 Répartition géographique du marché du pneumatique pour les poids lourds

Le marché du pneumatique dans le secteur des poids lourds est caractérisé par :

- une progression continue de la radialisation (taux de radialisation mondial : 68%)
- une large proportion de pneus de remplacement (83%) par rapport aux pneus dits de « première monte » (17%) qui correspondent au remplacement des pneus d'origine.
- une baisse des ventes depuis quelques années en raison de la crise financière.

- des possibilités de croissance du pneu pour poids lourds à architecture radiale en Asie, en Amérique du Sud et plus particulièrement en Inde et en Russie.

En Amérique du Nord, on compte 23 millions de pneus neufs pour bus et camions ce qui représente 16% du marché mondial et 18 millions de pneus réchappés.

1.2 Architecture d'un pneu radial

1.2.1 Composants d'un pneu radial

Simple en apparence, le pneu radial s'avère d'une architecture complexe. En effet, « un pneu est une structure composite, c'est-à-dire un assemblage solidaire de matériaux aux propriétés très diverses » devant assurer une structure souple et rigide à la fois [5].

La figure 1-2 [6] indique les principaux composants d'un pneu radial.

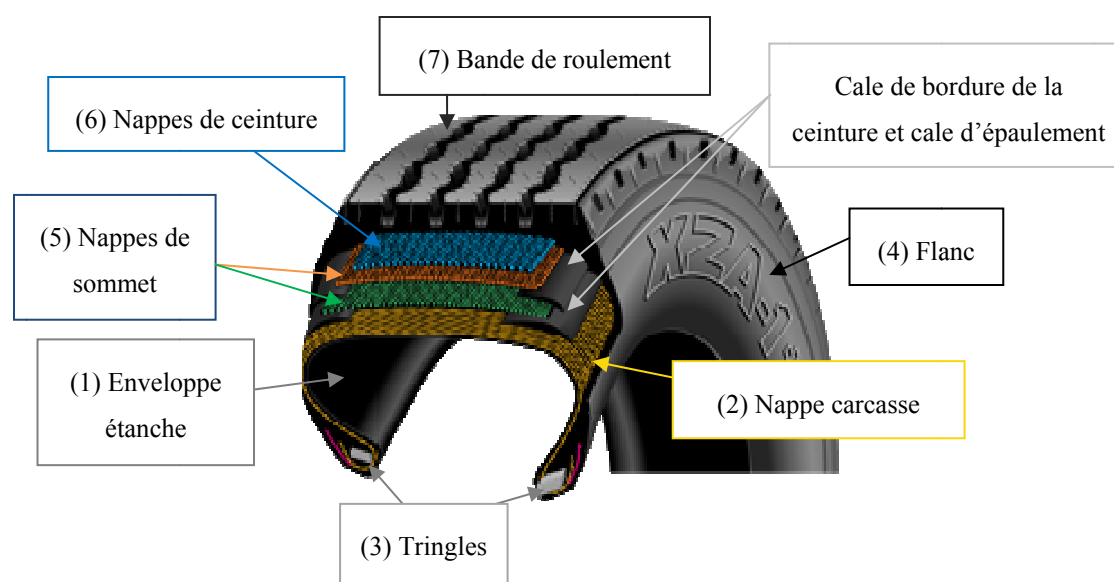


Figure 1-2 Architecture d'un pneu radial de camion

(1) Une enveloppe étanche.

Cette enveloppe étanche fait office de chambre à air. « Elle est constituée d'une double couche de caoutchouc synthétique possédant une haute imperméabilité à l'air comme les composés de caoutchouc bromobutyle renforcés par du noir de carbone » [7].

(2) La nappe carcasse

Située entre la gomme intérieure et le sommet, la nappe carcasse permet au pneu de résister à la pression interne grâce à une couche de câbles d'acier [7]. Ces câbles sont ancrés de chaque côté autour des tringles. Les matériaux de renfort utilisés pour la carcasse incluent également des fibres textiles comme le polyester.

(3) Les tringles

Faites d'un acier à haute résistance en tension, les tringles servent à serrer le pneu sur la jante.

(4) Les flancs

Sur les flancs, une couche de caoutchouc souple protège le pneu des chocs que peut subir le pneu (trottoirs par exemple). Le marquage du pneu y figure (cf. paragraphe 1.2.2).

(5) Les nappes de sommet

En ce qui concerne les pneus de camion, les nappes de sommet sont généralement constituées de « couches de câbles d'acier orientées les unes par rapport aux autres selon un angle de 20° environ » [7]. Le croisement des fils avec ceux de la carcasse crée des triangles indéformables permettant de rigidifier le sommet. Les nappes doivent être rigides aussi bien dans le sens circonférentiel du pneu pour ne pas s'étirer sous l'effet de la centrifugation que dans le sens transversal pour résister aux efforts de dérive. Elles empêchent ainsi la déformation de la bande de roulement en la rendant plus rigide. Elles doivent également être souples dans les sens vertical pour absorber les déformations de la chaussée [5].

(6) Les nappes de ceinture

« Ces nappes permettent de conserver un profil stable sous l'effet de la vitesse et ainsi, de réduire les échauffements » [5]. Il s'agit de nappes armées de câbles en nylon, sous forme de fil unitaire ou de bande de tissu inextensible perpendiculaire à la nappe carcasse. Elles permettent de

contrôler la dilatation du pneu causée par la force centrifuge lors du roulement à grande vitesse. Le nylon est généralement utilisé pour les nappes de ceinture puisqu'il se contracte lorsqu'il est chaud, assurant ainsi l'intégrité des ceintures du pneu [8].

(7) La bande de roulement

La bande de roulement, superposée aux nappes sommet, est la zone du pneu qui contient les sculptures. Puisqu'elle est en contact avec le sol, la bande de roulement doit garantir un faible échauffement, une bonne résistance à l'usure et à l'abrasion, une bonne adhérence dans diverses conditions climatiques ou de sols. « Le caoutchouc naturel est le composant principal des bandes de roulement des pneus de poids lourds ». Il s'agit d'un caoutchouc synthétique dans le cas des pneus de voiture de tourisme [9].

1.2.2 Marquage et choix d'un pneu

Le marquage du pneu correspond aux indications inscrites sur le flanc du pneu. On y retrouve diverses indications comme la largeur du pneu, la structure, l'indice de performance, l'indice de charge, l'indice de vitesse, etc...

A titre d'exemple, prenons un pneu sur lequel est inscrite l'indication : **215/55 R 16 93H** (figure 1-3). Cette notation correspond au marquage légal standardisé.

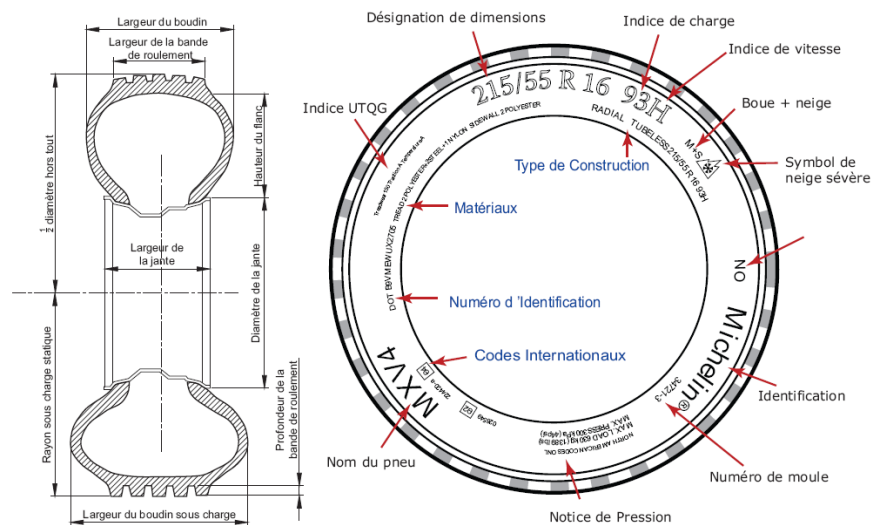


Figure 1-3 Marquage d'un pneu [1]

Les différents chiffres et lettres font référence aux informations suivantes :

215 : largeur nominale du pneu en mm

55 : « série » (hauteur du flanc par rapport à la largeur du pneu) exprimée en pourcentage

R : architecture du pneu, « R » pour radial et « D » pour diagonal

16 : diamètre de la jante (en pouces)

93 : indice de charge (cf. annexe 1)

H : indice de vitesse maximale (cf. annexe 1)

Les indices de charge et de vitesse se rapportent à la charge maximale et à la vitesse maximale d'utilisation du pneu. Une classe de vitesse inférieure à celle recommandée risque par exemple de nuire aux performances de conduite alors qu'une classe de vitesse plus élevée risque de réduire le confort de conduite [10].

Certains pneus de camion utilisent un marquage différent pour lequel le début de la séquence est modifié. L'indication de la série est omise et la largeur du pneu est donnée en pouces. Un pneu de taille 11R22.5 est par exemple un pneu radial de 11 pouces de largeur muni d'une jante de 22,5 pouces de diamètre.

Un choix de pneus appropriés est primordial pour la performance du véhicule puisque les pneus ont par exemple une influence sur la traction, le confort et l'économie de carburant.

Dans le cas des pneus de poids lourds, deux facteurs essentiels guident le choix du pneu [11]:

- l'application (autoroute, conduite en milieu régional, véhicules de plaisance, sur/hors route ou conduite en milieu urbain).
- la position (essieu directeur/toutes positions, essieux moteurs ou essieu porteur).

Des pneus spécifiques à chaque essieu du poids lourds sont utilisés :



Essieu directeur / toutes
positions

Essieu moteur

Essieu porteur

Figure 1-4 Choix du pneumatique selon l'essieu

- **Essieu directeur / toutes positions :**

Les pneus installés sur cet essieu, c'est-à-dire les pneus de direction (roues motrices) sont les plus importants du camion. Ils ont en effet une grande incidence sur la tenue de route et la maniabilité du véhicule. Les bandes de roulement striées permettent d'évacuer plus efficacement l'eau.

- **Essieu moteur :**

Les pneus de direction utilisés pour l'essieu moteur (couple de rotation) fournissent la traction. Les bandes de roulement en relief ou lamellisées maximisent la traction sur divers types de surface.

- **Essieu porteur :**

Les pneus de remorque doivent résister à une force latérale importante ainsi qu'aux forces de freinage et à différentes charges. Les flancs renforcés protègent la carcasse des dommages dus à l'usure sur les trottoirs.

Dans ce qui suit, nous considérerons le pneu de camion de taille 11R22.5. Des pneus de cette taille et provenant de la même gamme ont été utilisés lors des différents essais. Cette gamme correspond à des pneus de type radial toutes positions utilisés pour la grande route.

1.3 Matériaux constitutifs d'un pneu

Un pneu est « un assemblage précis de près de deux cents matériaux » [12]. Les propriétés de chacun de ces matériaux influent sur le comportement et les performances du pneu. Le choix de

ces matériaux dépend de la composante du pneu où le matériau sera utilisé, de l'utilisation souhaitée du pneu et varie selon le fabricant.

Dans un pneu radial de camion, on retrouve en moyenne [13] :

- 47% de caoutchoucs naturel et synthétique
- 36% de produits chimiques (noir de carbone en particulier)
- 17% de renforts textiles et câbles

Le caoutchouc est présent sous la forme de composés combinant plusieurs polymères : le caoutchouc naturel (NR), le polyisoprène synthétique, le polybutadiène et le styrène butadiène (SBR) (figure 1-5). Pour un pneu de camion, le pourcentage typique de caoutchoucs synthétique et naturel est 20% - 80%. Pour une voiture de tourisme, ce pourcentage est d'environ 55% - 45%.

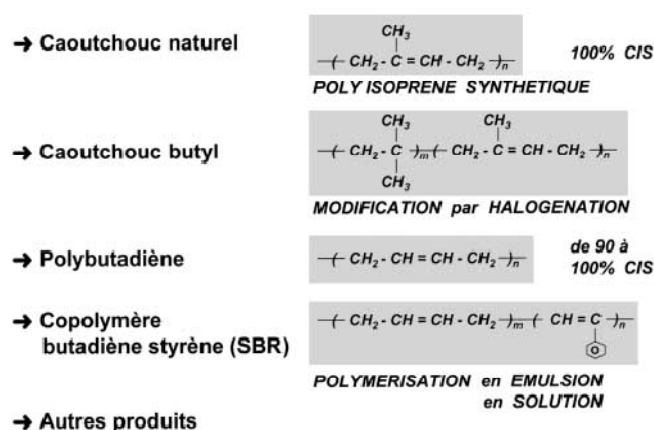


Figure 1-5 Les polymères du pneu [14]

Le caoutchouc naturel est produit à partir de la sève de l'hévéa qui contient des gouttelettes d'un polymère appelé polyisoprène. Le caoutchouc naturel a une résistance à la rupture élevée et il est possible de modifier sa rigidité par l'ajout du noir de carbone. « Il reste flexible jusqu'à -55 °C et peut être utilisé jusqu'à 80 °C (100 °C pour de courtes périodes) ». Son utilisation découle principalement de son faible échauffement viscoélastique [15].

Les caoutchoucs synthétiques ont quant à eux commencé à se développer à partir de la première guerre mondiale dans l'Allemagne bloquée. « La mise au point de procédés moins coûteux pendant la période d'entre deux guerres a permis pendant la seconde guerre mondiale un grand essor de la fabrication en Allemagne et aux États-Unis, coupés des plantations extrêmes orientales de caoutchouc naturel » [16]. Désormais, la demande en caoutchouc ne cesse de croître tandis que la production de caoutchouc naturel ne suffit plus.

Le polyisoprène synthétique est la version synthétique du caoutchouc naturel. Le caoutchouc styrène butadiène (SBR), lui, est un copolymère de styrène et butadiène possédant une grande résistance à l'abrasion et au vieillissement [17].

De nombreux produits chimiques interviennent dans l'élaboration d'un pneu. Des agents chimiques de renforcement sont par exemple utilisés parmi lesquels le noir de carbone et la silice. Le noir de carbone, obtenu par combustion incomplète de produits pétroliers lourds, est utilisé sous forme de poudre comme charge dans les pneus. « Il permet d'obtenir des mélanges plus résistants à la déchirure et à l'abrasion » [12]. La silice permet d'améliorer encore ces performances mais elle doit pour cela être associée à un agent de liaison et un procédé particulier.

On retrouve également des agents de fabrication (huiles, peptides, adoucisseurs), des agents d'adhésion et des composés avec différents groupes ligands pour faciliter l'adhérence avec les fibres textiles et les câbles d'acier [7] mais aussi des agents anti-dégradation (antioxydants et anti-ozonants). Le caoutchouc est en effet sensible aux agressions extérieures causées par l'oxygène et l'ozone. Les anti-oxydants permettent de limiter les réactions de dégradation en piégeant les radicaux responsables de cette dégradation.

Enfin, plusieurs réactifs sont utilisés pour réaliser la réaction de vulcanisation comme le soufre mais aussi des activateurs de vulcanisation (oxyde de zinc, acide stéarique) et des accélérateurs (sulfénamides, thiurames). La réaction de vulcanisation correspond à la réticulation du caoutchouc qui « donne à la fois les propriétés finales de chaque mélange constituant le pneumatique et la liaison entre ces différents mélanges » [14]. Le soufre peut par exemple « réagir avec les doubles liaisons de chaînes de caoutchouc en créant des ponts permettant de créer un réseau permanent ayant un comportement élastique » [15].

Les renforts, de nature métallique ou textile, contribuent à la longévité du pneu. Les renforts métalliques constituent par exemple l'armature des nappes de sommet et la carcasse et interviennent dans la fabrication des tringles. Les renforts textiles incluent le nylon, des fibres d'aramide, de rayonne, de verre ou de polyester.

CHAPITRE 2 LES PHÉNOMÈNES D'ÉCLATEMENT ET D'EXPLOSION DE PNEUS

Selon une étude menée sur l'incidence de l'état mécanique des poids lourds sur la sécurité routière [18], les défaillances causées par les pneus sont les plus dangereuses après celles causées par le système de freinage et les suspensions. On compte parmi ces défaillances les éclatements et les explosions de pneus qui, bien que relativement rares, sont très dangereux. Ces deux phénomènes sont d'autant plus dangereux qu'ils sont très difficiles à détecter voire même imprévisibles.

Bien que peu d'études scientifiques soient entièrement consacrées à l'un ou l'autre des phénomènes (les études réalisées par les fabricants de pneus restent dans le domaine privé), des informations pertinentes ont pu être récoltées dans la littérature. Cette première partie vise donc à mettre à jour les connaissances sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus en vue de mieux comprendre leurs mécanismes. Cette partie reprend avantageusement les analyses du rapport « Étude exploratoire sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus de camions lourds » publié par l'Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail (IRSST) de Montréal [7].

2.1 Définitions des phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneu

La différence entre éclatement et explosion étant parfois mal comprise, il est nécessaire à ce stade de définir ces deux phénomènes.

Un **éclatement de pneu** correspond à un bris de la structure du pneu lorsque celui-ci ne peut maintenir la pression contenue à l'intérieur. Son origine peut être mécanique, chimique voire même une combinaison des deux. Ce type d'évènement survient généralement lorsque le véhicule est en mouvement mais il peut également se manifester à l'arrêt et/ou lorsque le pneu est en train d'être gonflé [19]. Le principal danger résulte de l'évacuation très brève de l'air à l'intérieur du pneu qui peut provoquer des blessures très graves aux personnes se trouvant à proximité. Selon Cutler et al. [20], les pressions observées lors d'un éclatement sont de l'ordre de 0,7-1 Mpa (101,5–145 psi).

Une **explosion de pneu** est le résultat d'une réaction chimique impliquant une énergie bien supérieure à celle observée lors d'un éclatement. Une onde de choc générant une pression pouvant atteindre 7 Mpa (1015 psi) [21] est à l'origine de la rupture du pneu. Les explosions de pneus se manifestent principalement lorsque le véhicule est à l'arrêt [19].

La principale différence entre les deux phénomènes résulte des pressions mises en jeu. Les causes, les mécanismes et les conséquences de ces deux événements sont discutés en détails dans les sections suivantes.

2.2 Cas d'accidents recensés dans la littérature

2.2.1 Accidents survenus au Québec

L'éclatement et l'explosion sont des phénomènes particulièrement préoccupants dans le domaine des transports. Plusieurs cas d'accidents donnant lieu à des rapports d'enquête ont été répertoriés dans la littérature. Les accidents survenus au Québec ont été identifiés dans les bases de données des rapports d'accidents graves ou mortels et du dépôt de données centrales et régionales de la CSST (Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail). Les accidents répertoriés dans ces deux bases de données entre 1990 et 2004 figurent à l'annexe 2.

Le dernier accident en date est celui survenu le 6 juillet 2010 à Trois-Rivières où un homme a succombé à ses blessures infligées après le gonflage d'un pneu d'un véhicule industriel hors route. Cet accident succède à un autre accident du même type survenu le 8 décembre 2009 en Montérégie. Un jeune travailleur a connu une mort atroce puisqu'un pneu qu'il gonflait lui a éclaté au visage.

Les différents rapports indiquent que la plupart de ces accidents impliquent des véhicules lourds (camions et engins miniers). Ils surviennent par exemple durant les opérations de service en bord de route ou dans les stations service.

En analysant les données du tableau de l'annexe 2, il semble qu'un apport de chaleur au système pneu-jante soit responsable de la majorité des accidents. En effet, 9 accidents sur les 11 recensés (de 1990 à 2004) sont imputables à cette cause. Les autres accidents étant le résultat de l'endommagement d'un pneu ayant roulé en sous-pression ou encore d'une jante fissurée. On peut distinguer les différentes sources de chaleur de la manière suivante [7]:

- une source de chaleur s'exerçant directement sur la jante (soudure sur la jante ou surchauffe de la roue à la suite d'une défaillance du système de freinage)
- une source externe chauffant le pneu (flammes)
- une chaleur générée à l'intérieur du caoutchouc (réaction à une sollicitation mécanique importante ou résistance au passage d'un courant électrique de forte intensité et de haut voltage produit par la foudre ou un arc électrique à proximité d'une ligne haute tension)

Les analyses des statistiques de la CSST croisées avec la Classification Canadienne Descriptive des Professions (CCDP) et avec la Classification des Activités Économiques du Québec (CAEQ) donnent également des informations quant aux catégories professionnelles (tableau 2-1) et secteurs (tableau 2-2) les plus touchés par ces types d'accidents.

Tableau 2-1 Professions touchées par les éclatements et les explosions de pneu

Professions	Nombre de dossiers	%
Travailleurs spécialisés dans la fabrication, le montage et la réparation	140	38,9
Manutentionnaires et travailleurs assimilés	59	16,4
Personnel d'exploitation des transports	38	10,6
Travailleurs non classés ailleurs	33	9,2
Travailleurs spécialisés dans la vente	30	8,3
Total des cinq groupes les plus touchés	300	83,3
Total pour les autres groupes professionnels	60	16,7
Total de tous les groupes professionnels	360	100

Il est à noter que les cinq catégories professionnelles listées ci-dessus représentent 87% de l'ensemble des cas répertoriés.

On remarque que les travailleurs spécialisés dans la fabrication, le montage et la réparation sont de loin les personnes les plus touchées. Viennent ensuite les manutentionnaires et travailleurs assimilés.

Tableau 2-2 Secteurs touchés par les éclatements et les explosions de pneu

Secteur	Nombre de dossiers	%
Transports	55	15,3
Commerce de détail des véhicules automobiles, pièces et accessoires	93	25,8
Commerce de gros des véhicules automobiles, pièces et accessoires	52	14,4
Exploitation forestière	4	1,1
Constructeurs, promoteurs et entrepreneurs généraux	8	2,2
Carrières et sablières	2	0,6
Industries du papier et des produits en papier	1	0,3
Autres services	9	2,5
Industrie du bois	8	2,2
Industrie de première transformation des métaux	3	0,8
Total des 10 secteurs les plus touchés	235	65,3
Total des autres secteurs	125	34,7
Total de tous les secteurs	360	100

Les dix secteurs indiqués dans le tableau représentent 65,3% de tous les secteurs concernés par les accidents causés par l'éclatement ou l'explosion de pneus. Parmi eux, le secteur des transports est particulièrement touché.

2.2.2 Accidents survenus hors du Québec

Il serait impossible de recenser tous les accidents liés à l'éclatement ou l'explosion de pneus dans le monde. On se contentera ici de donner quelques exemples pertinents d'accidents survenus hors du Québec et qui ont pu être retrouvés dans la littérature.

Les accidents les plus marquants concernent les engins de mine et ont donné lieu à plusieurs rapports d'enquête dont ceux de la compagnie OTRACO.

OTRACO International Ltd est une compagnie spécialisée dans le suivi et la maintenance des pneus de gros engins de l'industrie minière. Elle effectue entre autres des enquêtes lors d'accidents faisant intervenir ces types de pneus. Un rapport publié en 2004 [20] fait état de 18 cas d'éclatement ou d'explosion de pneus entre 1981 et 2004 survenus aux quatre coins de monde (Angleterre, Argentine, Australie, Chili, Colombie, Indonésie, Papouasie-Nouvelle Guinée). Ces accidents résultent essentiellement d'un apport de chaleur direct sur la jante (par soudage ou surchauffe des freins), par un feu externe, par une mauvaise utilisation du pneu (sous gonflage), par un défaut dans la structure du pneu ou encore par un arc électrique (foudre ou ligne haute tension) [7].

Un exemple impressionnant est l'accident survenu sur un engin de mine Caterpillar 793 à la mine Radomiro Tomic au Chili en 2000 (figure 2-1). Le pneu avant-gauche explosa lorsque l'engin de mine était en train de freiner. L'onde de choc générée par l'explosion détruisit la cabine, tuant par la même occasion le conducteur. La photographie suivante témoigne de la violence du choc.



Figure 2-1 Explosion de pneu survenue à la mine Radomiro au Chili en 2000

2.3 Conséquences des phénomènes sur la santé

Relativement rares, les phénomènes d'éclatement ou d'explosion de pneus causent en majorité des blessures mortelles. Au Québec, on ne compte pas moins de deux décès tous les trois ans attribuables à l'éclatement ou l'explosion de pneu [7].

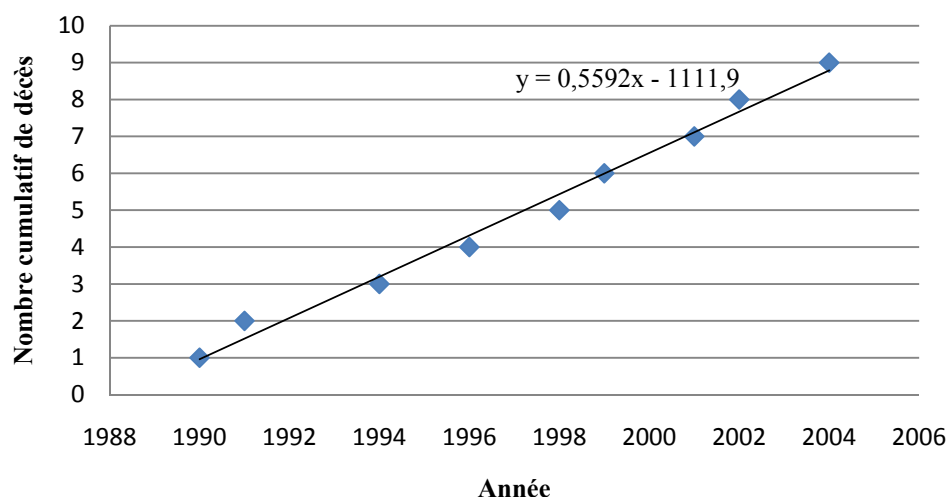


Figure 2-2 Nombre cumulé de décès causés par l'éclatement ou l'explosion d'un pneu entre 1990 et 2004 au Québec

Les données de la CSST indiquent que les accidents dont la cause est le pneu représentent 1% de l'ensemble des décès (période de 1995 à 2004). Selon ces mêmes données, les coûts engendrés par l'éclatement ou l'explosion des pneus sont largement supérieurs aux autres causes d'accidents. Ainsi, on comprend que les lésions liées à ces types d'accidents sont très graves.

La sévérité des blessures dépend de la taille du pneu, de la pression à l'intérieur du pneu et la distance entre le pneu et la victime. Les explosions affectent principalement le personnel assurant la maintenance des pneus de véhicules lourds comme les camions, les bus ou les remorques.

Selon une étude basée sur 763 cas d'accidents impliquant les pneus retrouvés dans la littérature [22], la tête et le visage sont les parties du corps les plus communément touchées (48% des cas)

suivis des membres supérieurs (20% des cas). Environ 25% de ces patients ont subi des multi traumatismes et dans l'ensemble, le taux de mortalité s'élève à 19%.

L'étude rapporte que la plupart des patients en question sont de jeunes hommes exerçant le métier de mécanicien. Les blessures à la tête et aux membres supérieurs se produisent le plus souvent lors du gonflage du pneu. Lorsque des blessures aux membres supérieurs sont observées, la main dominante est la plus souvent touchée ce qui entraîne une perte significative de fonctions.

Les blessures aux membres inférieurs se produisent principalement lors du montage du pneu sur le véhicule, ou lors du roulement de celui-ci vers la cage de sécurité. Selon cette étude, l'énergie générée lors de l'explosion d'un pneu peut être comparée à celle d'une grenade ou d'une mine sans les effets thermiques ou chimiques.

Les blessures résultent des effets primaire, secondaire ou tertiaire :

- Effets primaires : ils sont causés par l'onde de pression (onde de choc) qui peut briser les os rigides et/ou déchirer certains tissus. Cette onde de choc peut également provoquer des dommages sévères à des organes invisibles comme les poumons, le système auditif ou les intestins.
- Effets secondaires : ils sont causés par la projection de fragments ou de matières frappant la victime à haute vitesse. Les assemblages de roue multi-pièces sont considérés plus dangereux que les roues formées d'une seule pièce.
- Effets tertiaires : ils surviennent lorsque la victime est par exemple jetée à terre, contre un mur ou autres objets.

La plupart des personnes blessées ne peuvent retourner à leur précédent emploi. Des programmes de réhabilitation et une aide psychologique sont alors essentiels pour elles.

Les travaux menés dans le cadre de ce projet mettront en évidence l'importance des deux premiers effets.

2.4 Mécanismes des phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus

Plusieurs causes, qu'elles soient d'origine mécanique, chimique ou même une combinaison des deux, ont été répertoriées dans la littérature comme pouvant mener à un éclatement ou une explosion de pneu.

2.4.1 Éclatement d'origine mécanique

L'état du pneu et celui de la jante ainsi que leur montage sont les principaux responsables des éclatements d'origine mécanique. Benoît et al. [7] distinguent 4 types d'éclatements d'origine mécanique :

1) Une surpression lors du gonflage du pneu

« Les causes possibles sont :

- une pression du compresseur mal ajustée
- un problème de manomètre ou de valve
- une surpression volontaire lors du montage pour coller le pneu à la jante.

2) Le dézippage ou rupture éclair

Un défaut, une surcharge ou un impact peuvent provoquer une faiblesse, un bris ou une rupture de la carcasse du pneu. Le résultat peut entraîner une importante fuite d'air, la projection de fragments de pneu et une chute brutale de la pression à la zone de rupture, parfois accompagnées d'une marque ressemblant à un tissu décousu ou dézippé. Les cas de dézippage ou rupture éclair (« *zipper failure* » en anglais) se produisent généralement à mi-hauteur du flanc (figure 2-3).



Figure 2-3 Exemple de rupture éclair

Les causes possibles du dézippage sont :

- une détérioration de l'enveloppe exposant la toile ou la broche interne du pneu à une contamination par l'air ou l'humidité
- un impact mécanique qui a endommagé la structure du pneu
- une conduite avec un pneu en sous-pression ou en surpression
- une surcharge
- une perte des propriétés mécaniques due à la chaleur et la dégradation chimique du caoutchouc

- une usure importante de la carcasse
- un défaut de conception du tissage de la gaine. »

3) Le déjantage

Le déjantage se produit lors de la sortie accidentelle et soudaine du pneu de sa jante avec une évacuation violente de l'air ou d'autres gaz contenus dans le pneu.

Les causes peuvent être:

- un impact mécanique, plus ou moins violent, sur la jante ou le pneu
- une usure anormale de la jante
- une déformation de la jante ou de l'une de ses composantes à la suite d'une surchauffe
- un montage initial incorrect du pneu
- une incompatibilité des pièces de la jante (jante multi pièces)
- des dimensions du pneu non-conformes aux dimensions de la jante ou autres non conformités entre la jante et le pneu.
- le bris de la tringle lors du montage par une mauvaise manipulation des outils

4) Un pneu en mauvais état ou avec une faiblesse structurale

« Qu'il soit neuf ou usé, un pneu peut présenter un défaut structural plus ou moins perceptible et pourrait ne pas résister à la pression normale de gonflage » [7].

2.4.2 Éclatement ou explosion d'origine chimique

La principale cause des éclatements et explosions d'origine chimique est l'application de chaleur au pneu ou le développement de chaleur à l'intérieur de celui-ci. Par exemple, une opération de soudage sur la jante peut créer suffisamment de chaleur pour initier une réaction chimique interne. Un éclatement par surpression voire même une explosion peuvent alors se produire [23].

Les explosions ou éclatements de pneus survenant à la suite d'un apport de chaleur sont le résultat de la contribution de trois facteurs: l'expansion thermique de l'air à l'intérieur du pneu, la diminution des propriétés mécaniques de la structure du pneu et une réaction chimique [24]. Trois

réactions chimiques sont susceptibles de se manifester à la suite d'un apport de chaleur. Il s'agit des réactions de pyrolyse, de thermo oxydation et de combustion. Une réaction chimique peut se produire alors que la température de l'air ou des gaz à l'intérieur du pneu est inférieure à 100 °C [7]. La matrice polymère subissant des températures élevées, ces réactions modifient la structure chimique du pneu.

Les gaz et les matières inflammables produits lors de la dégradation thermique viennent contribuer à l'augmentation de la pression dans le pneu due à l'expansion thermique de l'air contenu à l'intérieur de celui-ci [7]. Associé à la diminution des propriétés mécaniques du pneu, il en résulte un éclatement du pneu voire même une explosion dans des conditions très particulières.

Des détails sur les trois facteurs cités précédemment se trouvent dans les paragraphes suivants.

2.4.2.1 Expansion thermique de l'air contenu à l'intérieur du pneu [24]

Lorsque l'air contenu à l'intérieur d'une enceinte fermée comme un pneu est soumis à une élévation de température, son volume augmente. Dans le cas des pneus, pour lesquels une telle augmentation de volume est limitée par la faible déformabilité de la structure composite, la pression à l'intérieur du pneu augmente. En considérant l'air comme un gaz parfait et en négligeant le faible changement de volume permis par la structure du pneu, la relation entre la température de l'air T_i et la pression P_i à cette température [24] peut être exprimée par:

$$\frac{P_i}{T_i} = \frac{P_0}{T_0} \text{ (avec T en Kelvin)} \quad (2.1)$$

Ainsi, pour un pneu gonflé à 0,72 Mpa (105 psi) à 20 °C, la pression atteindra 0,92 MPa (133 psi) à 100 °C et 1,41 Mpa (204 psi) à 300 °C. Toutefois, le risque d'éclatement par le seul effet de l'expansion thermique est limité.

2.4.2.2 Diminution des propriétés mécaniques de la structure du pneu

Selon Benoit et al. [7], la diminution des propriétés de résistance mécanique résulte de l'action directe de la température, d'un vieillissement chimique ou du phénomène de fatigue dans des conditions d'opérations normales ou sévères.

La température affecte grandement les différentes propriétés mécaniques statiques et dynamiques des caoutchoucs et des composites renfort-caoutchouc [25-27]. Cela concerne aussi bien les composants seuls que les liaisons entre ces composants [24]. Entre 25 °C et 100 °C, le caoutchouc subit par exemple un ramollissement de la structure polymérique qui se traduit par une légère diminution du module statique [28]. Entre 95 °C et 125 °C, des changements microstructuraux dans la matrice du pneu peuvent créer une relaxation de contraintes [25].

Différents processus de vieillissement chimique du caoutchouc peuvent également être répertoriés. Le vieillissement chimique est la modification de la structure chimique de la matrice polymère. Au cours de sa vie, un pneu subit l'influence de nombreux agents de vieillissement environnementaux comme l'oxygène, l'eau, l'ozone ou la lumière [7].

Enfin, la dégradation des propriétés mécaniques peut résulter de l'effet de fatigue lié aux sollicitations mécaniques appliquées. Cet effet est un facteur déterminant dans la durée de vie des pneus.

Si la diminution des propriétés mécaniques du pneu ne peut à elle seule mener à l'éclatement, elle peut se combiner à d'autres effets pour créer des conditions favorables à un éclatement ou une explosion [24].

2.4.2.3 Réactions chimiques

2.4.2.3.1 Pyrolyse

La pyrolyse (pyro- du grec (*pur, puros*) « feu » et -lyse, du grec ancien (*lusi*) « dissolution ») est par définition la « décomposition chimique d'une substance sous l'action de la chaleur en absence d'oxygène » [29]. En pratique, la réaction de pyrolyse peut également se produire dans le cas où l'apport d'oxygène est limité par diffusion [30]. Elle se produit dans la carcasse même du pneu et ceci, en quelques secondes. Il s'agit de la réaction chimique la plus souvent citée comme responsable de l'éclatement ou l'explosion.

Tous les corps organiques complexes (les polymères comme le caoutchouc par exemple) sont composés de chaînes de molécules. La chaleur permet de casser cette chaîne et de produire des molécules organiques plus petites [31]. Plusieurs mécanismes de dégradation peuvent être observés dont la scission aléatoire des chaînes, la modification des groupes latéraux, une réversion¹ ou une combinaison des trois [32].

Selon des études faites par thermogravimétrie [23], la pyrolyse du caoutchouc utilisé à l'intérieur du pneu peut commencer à une température d'environ 250 °C. Les analyses effectuées par Chen et al. [33] indiquent même que la pyrolyse peut être obtenue dès 185 °C. Il est à noter que cette température n'est pas la température mesurable sur la surface extérieure du pneu ni celle de l'air à l'intérieur du pneu. Le mélange de vapeurs explosives commence, lui, à s'auto-allumer à des températures proches de 430 °C. D'autre part, il a été calculé que la pyrolyse d'à peine 20 g de caoutchouc produit suffisamment de gaz pour engendrer une pression équivalente à la pression d'éclatement d'un pneu [23].

La dégradation thermique d'une section d'un flanc de pneu a été caractérisée par thermogravimétrie par Seidelt et al. [34]. La courbe obtenue révèle 3 principaux pics. Le premier pic (185 °C – 320 °C) est causé par la volatilisation d'additifs, notamment des huiles. Le second pic à 378 °C est attribuable à la décomposition du caoutchouc naturel. Enfin, le troisième pic à 458 °C résulte de la décomposition du caoutchouc styrène butadiène. Ces valeurs ont été obtenues avec une vitesse de chauffe de 10 K/min.

Les produits de la réaction de pyrolyse se divisent en 3 catégories :

- des matières solides (35 à 40 % en masse hors renforts aciers et textiles).

On compte parmi elles de fines particules de noir de carbone, des cendres et d'autres matériaux inorganiques comme de l'oxyde de zinc, des carbonates et des silicates.

- des huiles (38 à 55 %)

Il s'agit d'un « mélange complexe de composés organiques dont le toluène, les benzènes, les diméthycyclohexènes, les xylène, le styrène, le méthylcyclohexène et le limonène font partie » [7].

¹ La réversion est une rupture du réseau élastomérique par destruction ou raccourcissement des ponts de réticulation

- des gaz (10 à 30 %)

Les gaz produits lors de la pyrolyse de la matrice polymère constituant le pneu sont principalement des alcanes et des alcènes. Les alcanes sont des hydrocarbures saturés, constitués uniquement d'atomes de carbone C et d'hydrogène H liés par des liaisons simples. Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés qui possèdent une double liaison covalente entre deux atomes de carbone C. Les alcènes non cycliques ont une formule brute de la forme C_nH_{2n} .

2.4.2.3.2 *Thermo-oxydation*

La thermo-oxydation (ou combustion sous-stœchiométrique) est une oxydation provoquée par l'élévation de température. Cette réaction se produit à l'intérieur même de la carcasse de pneu en présence d'oxygène mais en quantité insuffisante pour une combustion [7]. Aussi, la réaction de thermo-oxydation ne peut survenir avec des pneus gonflés à l'azote dont le degré de pureté est supérieur à 95% (la thermo-oxydation est possible avec seulement 5% d'oxygène).

La thermo-oxydation se distingue de la pyrolyse par des températures de dégradation thermiques beaucoup plus faibles. Les deux réactions peuvent toutefois coexister en présence d'oxygène, « d'une part parce que les processus non-oxydatifs sont très rapides, et d'autre part, parce que la réaction de thermo-oxydation est contrôlée par la diffusion de l'oxygène » [7, 35].

Les produits de la réaction de thermo-oxydation se divisent, comme pour la pyrolyse, en 3 catégories :

- des solides
- des huiles
- des gaz (le monoxyde de carbone CO, le dioxyde de carbone CO₂, l'hydrogène H, et le dioxyde de soufre SO₂ sont propres à la réaction de thermo-oxydation)

2.4.2.3.3 *Combustion*

La combustion est définie comme « une réaction chimique exothermique d'oxydoréduction » [31]. La réaction de combustion ne peut se produire qu'en présence de trois éléments : un combustible (le caoutchouc), un comburant (le dioxygène) et une énergie d'activation (la chaleur) suffisante. La combustion provoque entre autre une diminution rapide des propriétés

mécaniques, un dégagement de fumée et de suie, un dégagement de gaz dangereux, une diminution de la concentration de l'oxygène de l'air et une augmentation de la température [36].

Des cendres et des gaz sont les uniques résidus de la combustion de la matrice polymère du pneu [37, 38]. En cas de combustion complète, les résidus gazeux sont uniquement composés de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre, d'azote et d'eau. Dans le cas contraire, on peut également retrouver du monoxyde de carbone et du monoxyde d'azote.

2.4.3 Considérations sur le phénomène d'explosion

Le phénomène d'explosion est similaire à l'éclatement par surpression d'origine chimique. En effet, l'explosion de pneu est également attribuable à un apport de chaleur qui déclenche une série de réactions chimiques. Celles-ci entraînent la dégradation chimique du pneu et la production de gaz et matières inflammables. Les gaz s'ajoutent au phénomène d'expansion thermique pour augmenter la pression à l'intérieur du pneu. Une explosion, plutôt qu'un éclatement, se manifeste lorsque les trois conditions critiques de concentration des gaz, de température des produits inflammables et de concentration en oxygène sont réunies. « Il en résulte une projection violente de débris qui est combinée à un incroyable déplacement d'air » [39].

Plusieurs rapports [23, 39-41] font état des principales causes des explosions de pneus. On compte parmi elles :

- une soudure sur la jante ou une pièce d'assemblage de la roue sur laquelle le pneu est encore monté.

Une soudure sur la jante est souvent citée comme cause la plus commune de surchauffe responsable d'une explosion.

- une surchauffe des freins (freins bloqués par exemple)

Selon [42], les pneus intérieurs des essieux arrières sont les plus exposés.

- une électrification du véhicule par la foudre ou par contact avec une ligne haute tension.

Certains pneus, en raison de la présence de ceintures et des renforts en acier, peuvent conduire l'électricité. De plus, un contact direct entre le véhicule et la ligne à haute tension n'est pas nécessaire pour créer un arc électrique. Il faut toutefois une tension dite de claquage suffisante

pour faire passer un arc électrique dans l'air et cette tension dépend, en plus de la tension et de la distance (30 kV/cm) de la forme de l'objet à proximité de la ligne ou de l'humidité de l'air [43].

- l'incendie du véhicule ou de la roue
- un sous-gonflage sévère du pneu ou une surcharge importante du véhicule

En cas de sous-gonflage ou de surcharge, une plus grande déflexion de la carcasse apparaît. Celle-ci entraîne par frottement une surchauffe interne du pneu au niveau de l'interface entre la bande de roulement et les flancs.

- la présence de matériaux combustibles, en particulier les matériaux avec des températures d'auto-allumage faibles, du carburant ou tout autre fluide déversé accidentellement et absorbé par le pneu.

Les matériaux combustibles peuvent accélérer la réaction chimique à l'origine d'une explosion. On peut par exemple citer l'huile de lubrification des compresseurs, les lubrifiants à base de produits pétroliers utilisés pour le montage des pneus ou encore les vapeurs d'essence aspirées par des compresseurs. De l'essence ou de l'éther sont par exemple utilisés comme scellant lors du montage de roue.

2.5 Processus général menant à l'explosion d'un pneu

Dans leur étude exploratoire sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus, René Benoit et al. [7] illustrent, en quatre étapes, la séquence des événements pouvant mener à un éclatement ou une explosion de pneu (figure 2-4).

Étape 1 :

Une source de chaleur qu'elle soit externe (frein bloqué, arc électrique, incendie...) ou interne (sous-gonflage, surcharge du pneu, vitesse excessive...) provoque une augmentation de la température du pneu et de l'air contenu à l'intérieur de celui-ci.

La pression augmente avec l'expansion thermique ce qui augmente le risque d'éclatement du pneu.

Étape 2 :

Lorsque le caoutchouc du pneu est chauffé à une certaine température (celle-ci peut correspondre à une température de l'air dans le pneu aussi basse que 100 °C), des réactions de dégradation

chimique du caoutchouc sont initiées. On peut mentionner la thermo oxydation, où la présence d'oxygène vient abaisser la température à partir de laquelle la dégradation thermique commence [30].

Ces différentes réactions chimiques produisent des gaz et des matières inflammables qui contribuent à augmenter la pression et par la même occasion le risque d'éclatement.

Il est à noter que même si les sources de chaleur ne sont plus actives, les réactions chimiques peuvent se poursuivre avec une intensité et une vitesse plus ou moins importantes.

Étape 3 :

Si l'augmentation de température se poursuit (que ce soit par l'apport de chaleur et/ou les réactions chimiques), l'accumulation de gaz et de matières inflammables due à la dégradation du caoutchouc continue et les propriétés mécaniques de la structure du pneu diminuent. À ce stade, le risque d'éclatement augmente considérablement.

Étape 4 :

Lorsque les trois conditions suivantes sont satisfaites :

- une concentration particulière des gaz (1-8 % du volume) [21]

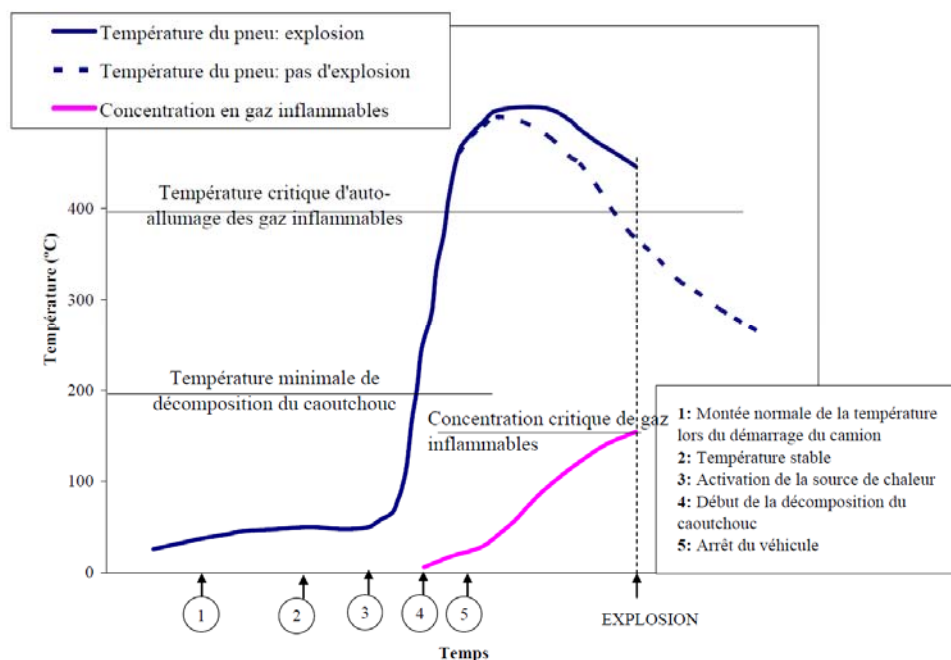
Cette concentration doit être comprise entre la limite inférieure d'explosivité (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LSE) du mélange gazeux [44]. Les limites LIE et LSE dépendent de la pression et de la température. En général, l'intervalle entre les deux limites augmente avec l'augmentation de la température ou de la pression [44].

- une température supérieure à la température d'auto-allumage des gaz
- une présence d'oxygène (concentration supérieure à 5,5%)

une explosion se produit.

Selon [21], la pression peut atteindre 6,9 MPa (1000 psi) lors de l'explosion alors qu'elle peut n'atteindre que 0,8 MPa (120 psi) lors d'un éclatement. Cette pression est toutefois suffisante pour causer des blessures graves voire mortelles d'autant que l'éclatement peut se produire à tout instant avant que les conditions de l'explosion ne soient réunies.

Prenons l'exemple d'une surchauffe de frein pour illustrer les différentes étapes du processus. La séquence supposée des événements lors d'une surchauffe de frein a pu être établie d'après un rapport de l'ONRSA [45] (figure 2-5) :



La première phase (1,2) se caractérise par une montée en température à la suite du démarrage du camion. Cette augmentation de température résulte des sollicitations mécaniques imposées au pneu lors du déplacement du véhicule.

Dès lors qu'une source de chaleur se manifeste, la température augmente fortement. Si cette température dépasse la température minimale de décomposition de caoutchouc (4), le caoutchouc commence à se dégrader. Malgré l'arrêt du véhicule, la température continue d'augmenter puisque le refroidissement généré par le déplacement du véhicule ne s'exerce plus et car la réaction de dégradation produit elle-même de la chaleur. La réaction chimique produit également des gaz et des matières inflammables dont les concentrations ne cessent d'augmenter.

« Le caoutchouc étant un mauvais conducteur ($\lambda = 0.2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), il peut entraîner une accumulation de chaleur qui, à partir d'un certain temps, fournit assez d'énergie pour que la réaction de dégradation chimique de type exothermique s'accélère de façon exponentielle » [7].

La dégradation thermique peut se poursuivre dès qu'une réaction thermique a déjà commencé et ceci, même si la source de chaleur est supprimée.

Si la température descend en dessous de la température critique d'auto-allumage des gaz et matières inflammables, le risque d'explosion est écarté.

Au contraire, une explosion peut survenir si la température reste supérieure à la température d'auto-allumage des gaz, si la concentration en gaz inflammable est comprise entre les limites inférieure et supérieure d'explosivité du mélange et que la concentration en oxygène est supérieure à 5,5%.

2.6 Délais de réaction

Le danger résulte principalement de l'imprévisibilité du phénomène. En effet, au vu des accidents recensés, il n'existe aucun moyen sûr de déterminer l'occurrence d'une explosion. Le délai de réaction peut varier de quelques secondes à plusieurs heures selon le cas.

L'étude [21] fait par exemple mention d'un accident impliquant un engin de mine Caterpillar 735. Celui-ci étant entré en contact avec une ligne électrique de 33000 Volt, il fut conseillé au conducteur de s'arrêter. Douze minutes environ après le contact avec la ligne électrique, le pneu avant-gauche de l'engin explosa.

Un délai de réaction bien plus long fut rapporté dans un autre accident survenu en avril 2004 au Québec. S'apercevant d'un problème du système de freinage de son véhicule (la roue arrière est partiellement bloquée), le conducteur du camion s'arrête sur le bas-côté de la route et attend un second véhicule. Une explosion se produit plus d'une heure plus tard. Cet exemple démontre également le fait que l'arrêt du véhicule ne suffit à empêcher l'occurrence d'une explosion. En réalité, la circulation d'air créée lors du déplacement du véhicule permet de refroidir le pneu. Ce refroidissement cessant lors de l'arrêt du véhicule, la température continue à augmenter même si la source de chaleur ne s'exerce plus [46].

S'il est impossible de prévoir le délai de réaction avec précision, il est toutefois possible de déterminer l'ordre de grandeur du délai de réaction. Il semble en effet que le délai de réaction dépende de la source de chaleur et donc des niveaux d'énergies mis en jeu.

Dans le cas d'une source de chaleur de très grande intensité (foudre ou contact avec une ligne haute tension par exemple), l'explosion peut survenir instantanément ou en quelques secondes à peine. En effet, sous l'effet d'une source de chaleur d'une telle intensité, la dégradation du caoutchouc se manifeste sur une surface importante du pneu ce qui permet d'atteindre immédiatement une concentration critique en gaz inflammables.

Dans le cas d'une source de chaleur de faible intensité, le délai de réaction est beaucoup plus long, de quelques minutes à plusieurs heures. Sous l'effet de cette source de chaleur, la dégradation du caoutchouc ne se produit que sur une petite surface à proximité du point d'initiation de la réaction. Une concentration critique en gaz inflammables n'est atteinte qu'au bout de plusieurs minutes voire plusieurs heures [47].

2.7 Analyse détaillée d'essais expérimentaux

Malgré le peu de références traitant particulièrement de l'éclatement et de l'explosion de pneus, des essais expérimentaux visant à reproduire ces deux événements ont tout de même été relevés [7, 48]. Ces rapports sont d'autant plus intéressants que les essais expérimentaux effectués sont similaires à ceux réalisés au Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs (LCRE) dans le cadre de ce projet. Bien que les essais présentés dans ces deux rapports n'aient pas donné suffisamment de réponses, ils constituent une base de comparaison avec nos propres essais.

2.7.1 Expérience réalisée par Michelin États-Unis²

Pour cette expérience, un pneu de camion monté sur sa jante est installé sur un banc d'essai (figure 2-6). Afin de créer un apport de chaleur au système pneu-jante, un robot contrôlé à distance réalise une soudure sur la jante durant une période de 35 secondes.

² Film obtenu grâce à M. Benoit Plamondon- Gérant du département Poids lourds et à M. Paul Labadie – Représentant sur la route pour le Centre de camion Desharnais Québec.

Une vidéo similaire d'essai d'explosion est disponible sur le site d'hébergement de vidéos YouTube à l'adresse suivante : <http://www.youtube.com/watch?v=HiLeji8bLOk>



Figure 2-6 Essai d'explosion par soudure sur la jante

La figure 2-7 illustre l'évolution temporelle de la température et de la pression. On constate que la température et la pression restent relativement stables lors des deux premières minutes. Au bout de deux minutes (soit moins d'une minute et trente secondes après la fin de la soudure), la température et la pression augmentent très rapidement.

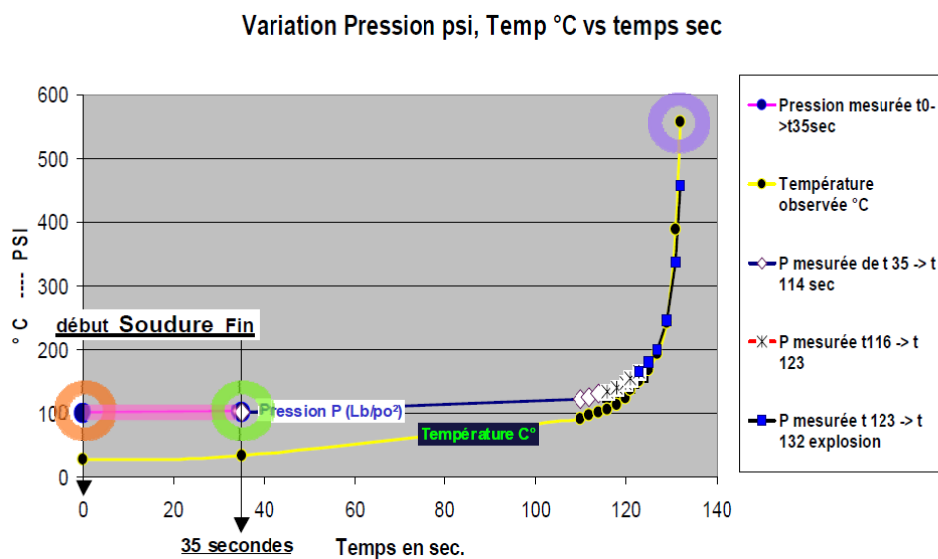


Figure 2-7 Variation de la température et de la pression internes d'un pneu en fonction du temps lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante [7]

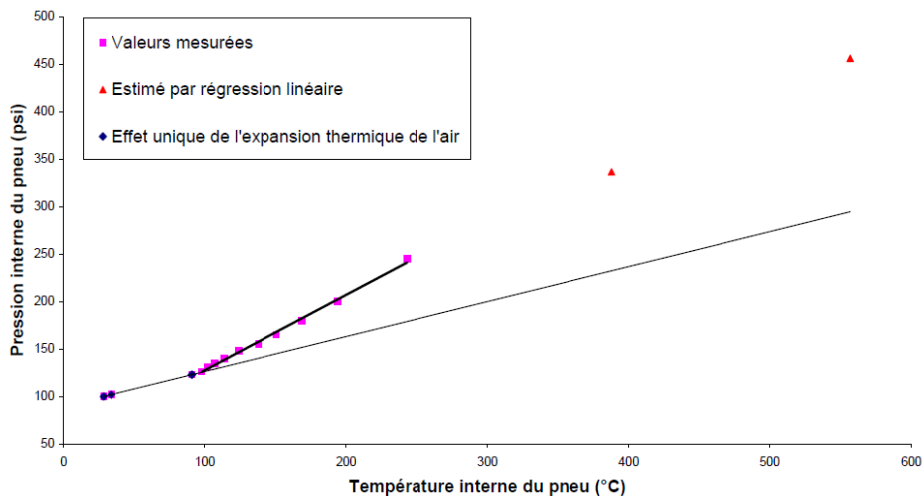


Figure 2-8 Variation de la température en fonction de la pression interne d'un pneu lors d'une expérience contrôlée d'explosion par chauffage au chalumeau de la jante [7]

Sur la figure 2-8, on constate que la courbe $P = f(T)$ tracée à l'aide des valeurs expérimentales s'éloigne de la courbe théorique correspondant au seul effet de l'expansion thermique dès 97 °C. Il s'agit là de la température de l'air contenu à l'intérieur du pneu et non de la température du

caoutchouc. En ajoutant le fait que la relation entre la pression et la température reste linéaire au-delà de 97°C mais avec une pente bien plus élevée, il est justifié de considérer l'amorce d'une réaction chimique à cette température.

Les études [49] et [50] ont mis en évidence la dépendance linéaire de la quantité de gaz produits en fonction de la température de la réaction pour la pyrolyse et la dégradation par thermo oxydation.

2.7.2 Rapport ACARP « Tyre fires and explosions of earthmover tyres » [48]

Ce rapport fait mention de plusieurs essais d'explosion par chauffage interne et externe de pneus gonflés à l'air et à l'azote ou encore de pneus dégonflés.

2.7.2.1 Méthode expérimentale

Quinze pneus identiques munis de leur jante sont équipés de 6 thermocouples internes et d'un capteur de pression. Les thermocouples sont reliés à distance à un système d'acquisition et les gonflages et dégonflages de chaque pneu, à l'air ou à l'azote, sont contrôlés à distance par une valve. Le pneu, dans sa position verticale, est placé dans une enceinte en métal.

L'apport de chaleur externe (figure 2-10) est matérialisé par la mise à feu du pneu avec deux boîtes en métal remplies d'essence. L'apport de chaleur interne (figure 2-9), simulant un frein bloqué par exemple est, elle, réalisée avec une torche d'oxyacétylène chauffant le centre de la jante.



Figure 2-10 Apport de chaleur externe



Figure 2-9 Apport de chaleur interne

2.7.2.2 Résultats expérimentaux

Le montage expérimental n'a pas été en mesure de reproduire le phénomène de pyrolyse de façon fiable ni même une explosion et ce, malgré l'application continue de chaleur. De plus, les pressions mesurées lors de la rupture varient considérablement d'un pneu à l'autre (ex : de 0,9 Mpa (130,5 psi) à 2,2 MPa (317 psi) pour le même type d'essai).

Les auteurs indiquent que le gonflage à l'azote semble réduire le phénomène de pyrolyse mais ne peut pas être considéré comme le principal moyen de réduire l'exposition au phénomène d'explosion.

CHAPITRE 3 MODÉLISATION D'UN PNEU PAR ÉLÉMENTS FINIS

L'utilisation des modèles éléments finis dans la conception et l'analyse des pneumatiques est devenue largement répandue depuis quelques années. Ceci résulte principalement de l'introduction des ordinateurs à hautes performances ajoutée à l'amélioration des capacités des logiciels déjà existants. Désormais, des modèles efficaces permettent de résoudre des problèmes liés au comportement du pneu et peuvent représenter une alternative aux essais expérimentaux menés habituellement sur des prototypes [51].

De nombreuses études ont été consacrées au comportement du pneu [51-71], (la liste de références précédente est loin d'être exhaustive). Ces études concernent principalement la distribution des contraintes de contact au sol, la propagation de fissures, la mesure de la résistance au roulement, la distribution de la température, les vibrations ou encore l'étude du phénomène d'aquaplanage.

Plusieurs modèles et stratégies de simulations de pneumatiques sont accessibles dans la littérature [59, 60, 64, 68, 72, 73]. Le choix de ceux-ci dépend notamment des objectifs de simulation et des moyens techniques à disposition.

La modélisation d'un pneumatique par éléments finis constitue un véritable enjeu car de nombreuses contraintes doivent être prises en compte. Le comportement du caoutchouc (grandes déformations et incompressibilité), les différents renforts (orientation particulière) et les différents contacts représentent les principales difficultés de modélisation. Si la précision des simulations dépend principalement du modèle numérique de pneumatique utilisé, il est nécessaire en pratique de trouver un compromis entre précision des résultats et temps de calculs.

3.1 Modèle numérique

Le modèle géométrique du pneu a été créé à l'aide du logiciel Catia V5 R19. Le modèle 3D (figure 3-1 et figure 3-2) utilisant les éléments finis a, quant à lui, été créé avec le logiciel Altair Radioss dans sa version 10.

Il se compose des éléments suivants :

- une jante en aluminium
- une matrice en caoutchouc

- une nappe carcasse
- des nappes de sommet
- des nappes de ceinture

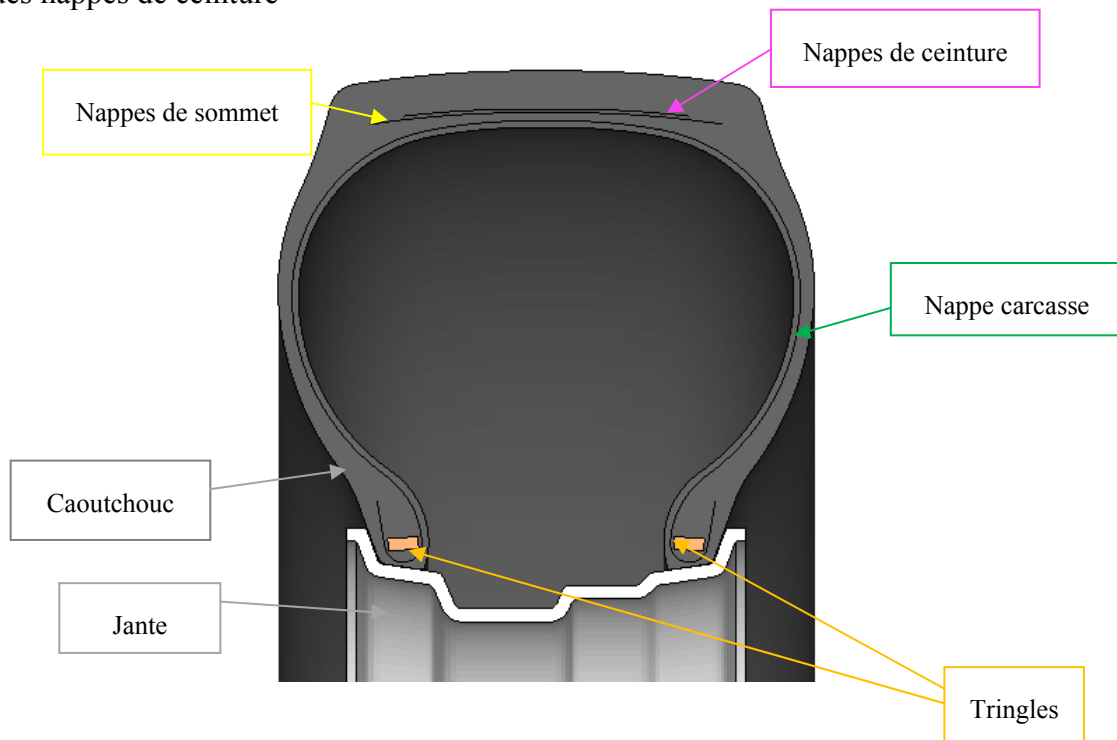


Figure 3-1 Modèle du pneu de taille 11R22.5

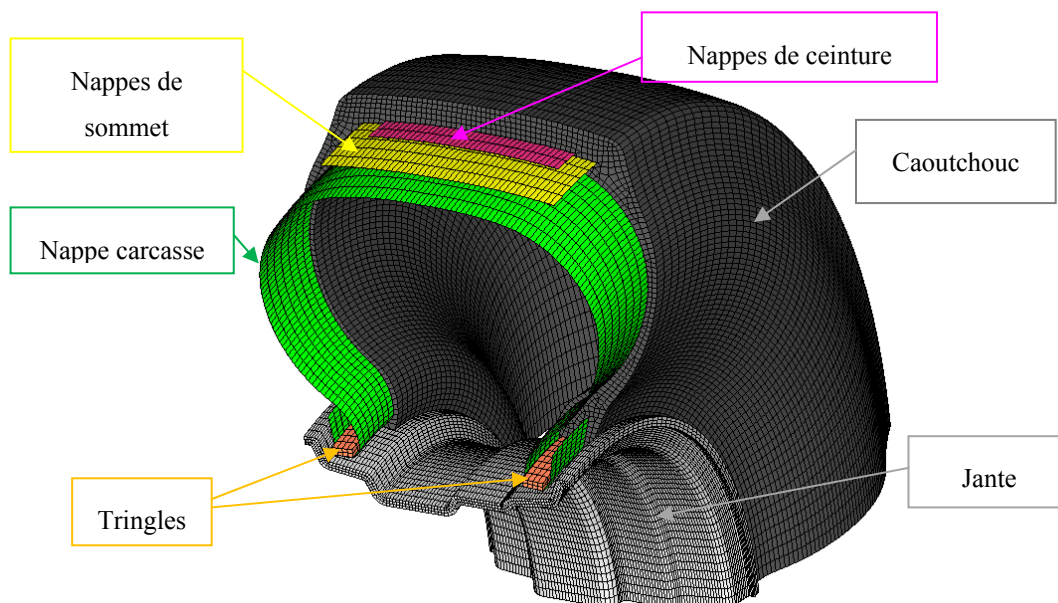


Figure 3-2 Section du pneu mettant en évidence les différents composants du pneu

Une moitié de roue a d'abord été modélisée pour la simulation de l'explosion. Compte-tenu des conditions de symétrie et puisque le même modèle géométrique est utilisé pour la simulation des deux évènements, la simulation de l'éclatement utilise uniquement un quart de roue. Les propriétés mécaniques des différents matériaux constituant le pneu, les différentes propriétés et interfaces utilisées dans le modèle éléments finis sont passées en revue dans les paragraphes suivants.

3.2 Propriétés des différents composants d'un pneu

3.2.1 Jante

Les jantes utilisées pour les poids lourds sont généralement fabriquées en acier ou en aluminium. Si l'usage de l'acier reste majoritaire, l'aluminium présente l'avantage d'être plus léger et d'un certain point de vue, plus esthétique. Le gain de masse apporté permet par exemple d'augmenter la charge utile et faciliter les opérations de montage.

Les propriétés mécaniques de l'aluminium, considéré comme élastique dans les simulations d'explosion, figurent au tableau 3-1.

Tableau 3-1 Propriétés mécaniques de l'aluminium

Matériau	Densité ρ (kg/m ³)	Module élastique E (GPa)	Coefficient de Poisson ν
Aluminium	2700	70	0,33

Pour des raisons de sécurité évidentes, la taille de la jante doit être choisie selon les recommandations du constructeur de pneu.

Enfin, nous définissons ici les termes « côté disque » et « côté opposé au disque » à des fins de compréhension (figure 3-3). Ces derniers seront

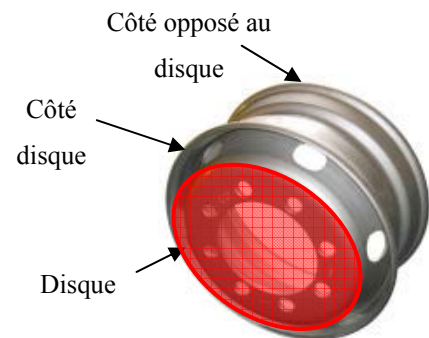


Figure 3-3 Jante de camion en aluminium

évoqués aux chapitres suivants pour faire référence respectivement au côté de la jante où se fixe le tambour et le côté opposé à celui-ci.

3.2.2 Tringles

Les tringles, qui assurent une bonne assise du pneu sur la jante, sont composées de plusieurs brins d'acier à haute résistance de forme rectangulaire ou circulaire. Les déformations maximales des tringles sont relativement faibles car limitées seulement à quelques 2,3 %.

Un modèle de comportement plastique du type Johnson–Cook (MAT/LAW2 dans Radioss) est utilisé pour modéliser le comportement de l'acier. Ce dernier se comporte comme un matériau élastique linéaire lorsque la contrainte équivalente reste inférieure à la limite d'écoulement. Pour des valeurs de contrainte supérieures, son comportement devient plastique et la relation entre la contrainte et la déformation lors de la déformation plastique est donnée par la formule suivante :

$$\sigma = (a + b \varepsilon_p^n) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^{*m}) \quad (3.1)$$

Avec

σ : contrainte (élastique + plastique)

ε_p : déformation plastique

a : contrainte d'écoulement

b : module tangent

n, m : exposants

c : coefficient de taux de déformation

$\dot{\varepsilon}$ et $\dot{\varepsilon}_0$: taux de déformation

$T^* = (T - 298) / (T_{\text{fusion}} - 298)$ où les températures sont exprimées en Kelvin

Dans le cadre des simulations numériques, nous adoptons un modèle linéaire ($n = 1$) et ne tenons compte ni de la température ni du taux de déformation ($c = T^* = 0$).

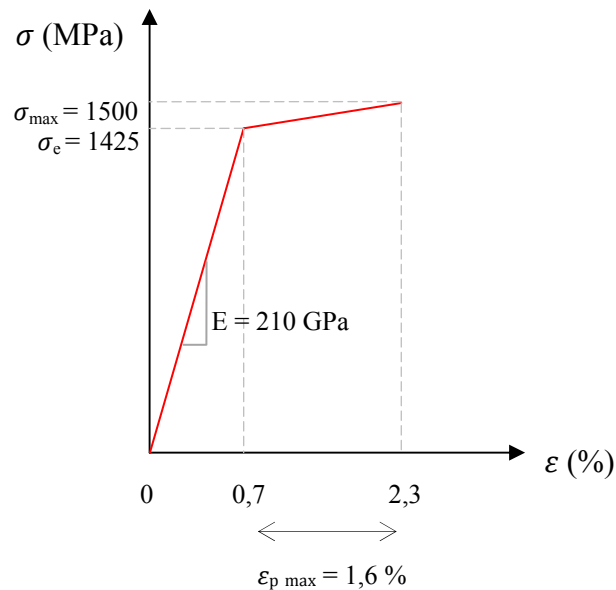


Figure 3-4 Courbe contrainte - déformation de l'acier à haute résistance

Les propriétés mécaniques de l'acier utilisé pour les tringles figurent dans le tableau 3-2:

Tableau 3-2 Propriétés mécaniques de l'acier des tringles et de la jante

Matériau	Module élastique E (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Densité ρ (kg/m ³)	Limite élastique σ_e (MPa)	Contrainte maximale σ_{\max} (MPa)	Déformation plastique maximale $\varepsilon_{p \max}$	Module tangent b (MPa)
Acier	210	0,3	7850	1425	1500	0,016	4630

3.2.3 Caoutchouc

Les composants élastomères utilisés dans les pneus ont des propriétés mécaniques non linéaires et peuvent subir de grandes déformations élastiques. Dans la plupart des cas, ils agissent comme des matériaux incompressibles. Cela signifie que le matériau ne subit aucun changement volumétrique

sous une pression externe. En réalité, les caoutchoucs, qu'ils soient naturels ou synthétiques, sont faiblement incompressibles.

Plusieurs modèles peuvent être utilisés pour décrire le comportement hyper élastique du caoutchouc comme le modèle de Yeoh, Arruda-Boyce, Ogden ou celui de Mooney-Rivlin [61].

Dans le cadre de cette étude, le caoutchouc est supposé être isotrope, élastique non linéaire et ses caractéristiques viscoélastiques ne sont pas considérées. Ces hypothèses sont celles utilisées dans la plupart des études retrouvées dans la littérature. Les propriétés mécaniques non linéaires du matériau sont décrites par la loi de Mooney-Rivlin.

Loi de Mooney-Rivlin [74]

La loi de Mooney-Rivlin est obtenue à partir de la fonction énergie de déformation W . Celle-ci est exprimée en fonction des trois invariants des déformations principales I_1 , I_2 et I_3 de telle sorte que $W = W(I_1, I_2, I_3)$.

Les trois invariants I_i peuvent à leur tour être exprimés en fonction des allongements λ_i ($\lambda_i = 1 + \varepsilon_i$, ε_i étant la déformation principale i) :

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (3.2)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (3.3)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (3.4)$$

On considère le caoutchouc incompressible ce qui suppose en théorie un coefficient de Poisson égal à 0,5 ($\nu = 0,5$) et le troisième invariant unitaire. Toutefois, $\nu = 0,495$ est un bon compromis pour éviter des pas de temps trop petits dans les codes explicites [74]. Nous utiliserons donc cette valeur dans les simulations numériques.

Comme $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 = 3$ pour un matériau incompressible, λ_3 peut être éliminé des équations précédentes, si bien que W peut s'exprimer simplement en fonction de I_1 et I_2 .

La loi de Mooney-Rivlin donne alors l'expression de l'énergie de déformation suivante :

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (3.5)$$

où C_{10} et C_{01} sont des paramètres du matériau.

La loi MAT/LAW42 (OGDEN) est utilisée dans RADIOSS pour définir le caoutchouc et celle-ci donne l'énergie de déformation sous la forme générale :

$$W = \sum_p \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (3.6)$$

La loi d'Ogden est une formulation plus générale pour modéliser des matériaux faiblement compressibles comme le caoutchouc et les mousses élastomères supportant de larges déformations avec un comportement élastique.

La loi de Mooney-Rivlin peut être appliquée via la loi d'Ogden en utilisant les coefficients suivants :

$$\mu_1 = 2 C_{10} \quad (3.7)$$

$$\mu_2 = -2 C_{01} \quad (3.8)$$

$$\alpha_1 = 2 \quad (3.9)$$

$$\alpha_2 = -2 \quad (3.10)$$

Les valeurs utilisées pour définir le caoutchouc sont rassemblées dans le tableau 3-3 :

Tableau 3-3 Paramètres de la loi de Mooney-Rivlin pour le caoutchouc

v	μ_1 (MPa)	μ_2 (MPa)	α_1	α_2
0,495	1,6	-3,6	2	-2

3.2.4 Renforts

3.2.4.1 Techniques de modélisation des renforts

Les renforts de la structure du pneu ont une très grande importance sur le comportement global du pneumatique. Les cordes et les différents plis constituant les nappes ont des orientations et des épaisseurs bien définies qu'il est essentiel de prendre en compte. La précision des résultats issus des simulations dépend en grande partie de la capacité à concevoir un modèle numérique tenant compte de la construction composite d'un pneumatique.

Quatre modèles peuvent être utilisés pour représenter les renforts [66] : le modèle caoutchouc renforcé, le modèle « *rebar layer* » [52], le modèle composite stratifié (« *laminated shell* ») et le modèle treillis (« *truss* »).

La figure 3-5 montre un élément en caoutchouc avec ces différents renforts. Deux des quatre modèles sont développés dans les paragraphes suivants.

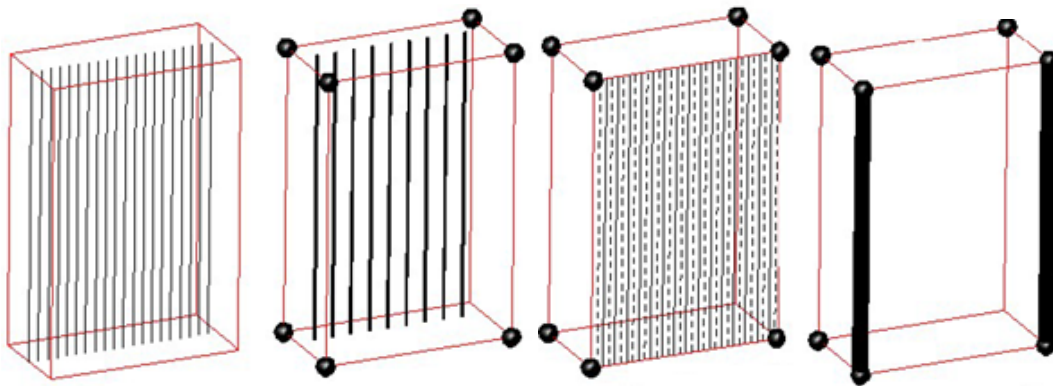


Figure 3-5 De gauche à droite: modèle caoutchouc renforcé, modèle « *rebar layer* », modèle composite stratifié et modèle en treillis

3.2.4.1.1 Modèle « *rebar layer* »

Cette technique, non disponible avec le logiciel Altair Radioss, a été privilégiée dans la plupart des articles retrouvés dans la littérature [51-54, 75]. Elle permet par exemple de spécifier l'aire de la section des fibres, l'écart entre deux fibres successives et leur orientation [64]. Les éléments *rebar* et

les éléments solides sont utilisés pour modéliser respectivement les cordes de renfort et le caoutchouc. L'élément en caoutchouc inclut une seule couche ou plusieurs couches de cordes de différentes directions (figure 3-6) [52].

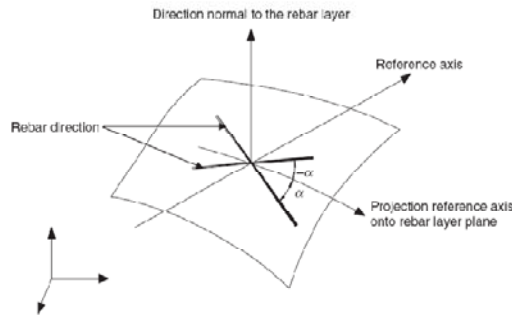


Figure 3-7 Description de l'orientation d'une simple couche *rebar*

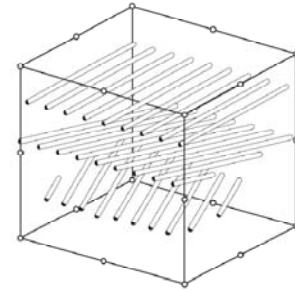


Figure 3-6 Éléments *rebar* permettant de simuler les cordes de renforcement dans le caoutchouc

En plus des caractéristiques concernant les fibres citées précédemment, les propriétés des matériaux de chaque couche de renfort, un plan et des axes de référence sont définis.

3.2.4.1.2 Modèle composite stratifié

Ce modèle fait appel à la mécanique des matériaux composites. Les différentes nappes peuvent être considérées comme une distribution uniforme de fibres dans une matrice en caoutchouc. Les propriétés mécaniques des éléments de renfort sont calculées par un processus d'homogénéisation en se basant sur les propriétés des fibres et du caoutchouc. C'est le modèle que nous utilisons avec le logiciel Radioss à travers la loi de matériau 19 (/MAT/LAW19 (FABRI)) correspondant à un matériau composite élastique orthotrope.

Les différentes propriétés mécaniques (modules élastiques dans les directions longitudinale et transversale, de cisaillement et le coefficient de Poisson en particulier) doivent être définies pour utiliser cette loi. Les nappes sont modélisées par des éléments coques (« *shell* ») ayant un maillage coïncident avec le caoutchouc selon le principe illustré à la figure 3-8 [76].

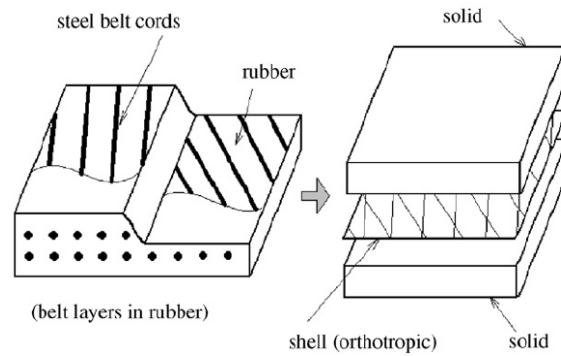


Figure 3-8 Modélisation des renforts sous formes de coques orthotropes

3.2.4.2 Nappes de sommet en acier

Hong-Hai Nguyen [1] utilise le terme « couche élémentaire » pour identifier une nappe de sommet en acier. Il définit cette couche élémentaire comme « une couche mélangée de câbles composés de trois fils en acier torsadés avec le caoutchouc comme la matrice dans un modèle fibre-matrice ». Les nappes de sommet (figure 3-9) correspondent à deux couches élémentaires de 0,6 mm d'épaisseur avec les angles de rotation ± 20 degrés et d'une couche de caoutchouc de 0,6 mm d'épaisseur.

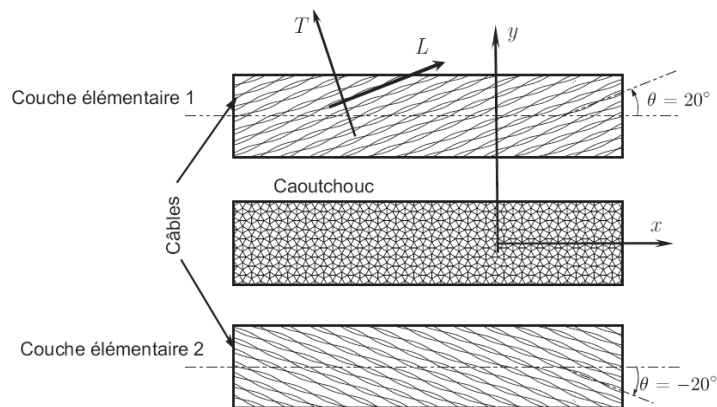


Figure 3-9 Constitution des nappes de sommet [1]

Dans son étude, Hong-Hai Nguyen calcule certaines propriétés (modules longitudinaux et

transversaux, coefficient de Poisson) d'une couche élémentaire par la loi des mélanges et compare les valeurs calculées à celles mesurées expérimentalement. Les fractions volumiques, nécessaires à l'application de la loi des mélanges, sont calculées en faisant brûler une éprouvette parallélépipédique. Les fractions volumiques du caoutchouc (Φ_r) et des câbles (Φ_c) obtenues sont :

$$\Phi_r = 78,35\% \text{ et } \Phi_c = 21,65\%$$

Des essais de traction ont permis de mesurer le module élastique d'un câble d'acier E_c composant la couche élémentaire. Le module élastique du caoutchouc E_r , supposé ici comme isotrope, est mesuré à l'aide de la loi de contact statique de Hertz (interpénétration d'une bille d'acier soumise à une force P dans un plan en caoutchouc).

Tableau 3-4 Propriétés mécaniques du caoutchouc et d'un câble d'acier
utilisées dans la loi des mélanges

	E [MPa]	v	ρ [kg/m³]
Caoutchouc	7	0,49	1000
Câble d'acier	162,55	-	-

La loi des mélanges permet de déterminer les différentes propriétés mécaniques d'une couche élémentaire à l'aide des formules classiques :

$$E_T = \frac{E_r E_f}{\phi_f E_r + \phi_r E_f} \quad (3.11)$$

$$E_L = \phi_f E + \phi_r E_r \quad (3.12)$$

$$v_{LT} = \phi_f v_f + \phi_r v_r \quad (3.13)$$

$$G_{LT} = \frac{G_r G_f}{\phi_f G_r + \phi_r G_f} \quad (3.14)$$

Les valeurs théorique et expérimentale des propriétés mécaniques figurent au tableau 3-5:

Tableau 3-5 Comparaison des valeurs théorique et expérimentale des propriétés mécaniques d'une couche élémentaire

	Direction longitudinale		Direction transversale	45° par rapport aux câbles
	E_L (GPa)	v_{LT}	E_T (MPa)	G_{LT} (MPa)
Loi des mélanges	35,14	0,463	9,1	-
Valeur expérimentale	33,7	0,472	9,0	4,5

Pour des raisons relatives au maillage, une seule coque (« *shell* ») est modélisée pour représenter les 2 nappes de sommet en acier c'est-à-dire l'empilement des deux couches élémentaires et de la couche de caoutchouc. En effet, les nœuds appartenant à la matrice de caoutchouc et les nappes sont coïncidents pour lier les nappes au pneu. La distance entre les deux couches élémentaires étant très faible, des éléments (de caoutchouc) de petite taille auraient dû être créés. Puisque le pas de temps du calcul est lié à la longueur caractéristique des éléments (cf. chapitre 3), il a été choisi de modéliser des éléments de plus grande taille pour limiter les problèmes de convergence et le temps global des calculs.

Reste alors à déterminer les propriétés équivalentes de l'unique nappe représentant les nappes de sommet. En complément des essais de traction issus des travaux de Nguyen, les propriétés

mécaniques équivalentes de ces nappes sont déterminées à l'aide d'un modèle composite multicouche. Avec les propriétés mécaniques des couches élémentaires et celles du caoutchouc, on peut effectivement calculer les modules « apparents » des nappes de sommet. Le détail de ces calculs figure en annexes 3 et 4.

Les propriétés mécaniques équivalentes des nappes de sommet qui ont été calculées et mesurées sont synthétisées dans le tableau 3-6:

Tableau 3-6 Propriétés mécaniques équivalentes des nappes de sommet

	E_x (MPa)	E_y (MPa)	G_{xy} (MPa)	v_{yx}
Valeur calculée	367,4	8,9	183,2	0,133
Valeur mesurée	334	9,76	-	0,159

3.2.4.3 Nappe carcasse et nappes de ceinture

Les matériaux de renfort utilisés pour la carcasse et les nappes de ceinture incluent différentes fibres textiles comme le polyester et le nylon ainsi que des câbles d'acier. Les propriétés mécaniques du polyester et du nylon [1] sont données à titre d'information au tableau 3-7.

Tableau 3-7 Propriétés mécaniques du polyester et du nylon

Catégories	Module élastique (GPa)		Densité (g/cm³)
	Écru	Imprégné	
Nylon 6	2,1	2,5	1,144
Nylon 6,6	2,2	2,9	1,145
Polyester	6,7	8,5	1,394

Les propriétés mécaniques des deux types de nappes sont celles retrouvées dans l'étude [62] où un modèle similaire à celui développé dans cette partie a été adopté (tableau 3-8).

Tableau 3-8 Propriétés mécaniques des nappes carcasse et de sommet

	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	ρ (kg/m³)
Nappe carcasse	1196,15	13,3	4,438	0,460	1150
Nappes de ceinture	809,37	14,75	4,924	0,444	1150

3.2.5 Synthèse sur les propriétés mécaniques

Une synthèse des propriétés mécaniques utilisées pour les simulations numériques est donnée dans le tableau 3-9.

Tableau 3-9 Propriétés mécaniques des différents composants d'un pneu

Composante	Matériau	Quantités	Valeurs
Jante	Aluminium	E (MPa) ν ρ (kg/m ³)	70 0,33 2700
Tringles	Acier à haute résistance	E (GPa) b (GPa) n ν ρ (kg/m ³) σ_e (MPa) σ_{max} (MPa) ϵ_{max} (%) $\epsilon_{p\ max}$ (%)	210 4,63 1 0,3 7850 1425 1500 2,30 1,6
Pneumatique	Caoutchouc	μ_1 (MPa) μ_2 (MPa) α_1 α_2 ν ρ (kg/m ³)	1,6 -3,6 2 -2 0,495 1000
Nappes	Nappes de sommet	E_L (MPa) E_T (MPa) G_{LT} (MPa) ν_{TL} ρ (kg/m ³)	367,4 8,9 183,2 0,133 2014
	Nappe carcasse	E_L (MPa) E_T (MPa) G_{LT} (MPa) ν_{LT} ρ (kg/m ³)	1196,15 13,3 4,438 0,460 1150
	Nappe de ceinture	E_L (MPa) E_T (MPa) G_{LT} (MPa) ν_{LT} ρ (kg/m ³)	809,37 14,75 4,924 0,444 1150

3.2.6 Propriétés des éléments

Une des deux propriétés suivantes est attribuée à chacun des composants du modèle :

- la propriété SOLID pour les éléments solides 3D (jante, caoutchouc et tringles)

Il s'agit de la propriété générale utilisée pour les éléments solides.

- la propriété SH_ORTH pour les nappes

Cette propriété est utilisée pour modéliser des coques ayant un comportement orthotrope. Les informations relatives à l'épaisseur et l'orientation des nappes y sont définies.

Les informations qui concernent le maillage (nombre et type d'éléments, propriétés) sont rassemblées dans le tableau 3-10. Le nombre d'éléments est donné pour une moitié de roue.

Tableau 3-10 Propriétés du maillage de la roue

	Matrice caoutchouc	Nappe carcasse	Nappes de sommet	Nappe de ceinture	Tringles	Jante
Nombre d'éléments	107200	19600	4600	3800	1600	36300
Type d'éléments	Hexa & Tétra	Quad	Quad	Quad	Hexa	Hexa & Tétra
Propriété utilisée dans RADIOSS	SOLID	SH_ORTH	SH_ORTH	SH_ORTH	SOLID	SOLID
Épaisseur nappe (mm)	-	2	1,8	2	-	-
Orientation nappe (°)	-	90	+/- 20 (0 après processus d'homogénéisation)	0	-	-

3.3 Interfaces

3.3.1 Interface pneu / jante

Certains auteurs [53, 54] utilisent un contact simplifié (« *total contact* ») entre la jante et le pneu n'autorisant aucune séparation ou glissement entre les deux corps. Nous considérerons ici une friction entre le pneu et la jante pour tenir compte du glissement du pneu par rapport à la jante observable lors d'une explosion ou d'un éclatement de pneu par surpression. L'interface de type 7 (« *General purpose interface* ») avec un coefficient de friction comme paramètre est utilisée à ce titre. Alors que W.Hall et al. [59] utilise un coefficient de friction égal à 0,1, R.R.Neves [75] utilise quant à lui un coefficient de friction variant entre 0,6 et 0,3 pour des conditions statique et dynamique. Un coefficient de friction de 0,5 a été adopté par Guan Yanjin et al. [52]. Les valeurs des coefficients de friction retrouvées dans la littérature sont donc très variables. Toutefois, un contact avec un coefficient de friction inférieur à 0,2 est fortement recommandé selon [64] pour éviter des problèmes de convergence et de longs temps de calculs qui y sont associés. Cela s'est confirmé lors des différents essais de simulations et un coefficient égal à 0,1 fut adopté à ce titre.

3.3.2 Interfaces pneu / tringles et pneu / nappes

Aucune interface n'a été considérée pour modéliser les contacts entre le pneu (matrice caoutchouc) et les tringles et entre le pneu et les différentes nappes. Les composants cités précédemment partagent des nœuds communs pour empêcher tout glissement ou la présence de vide entre les différents matériaux.

3.4 Conditions limites et chargement appliqué

3.4.1 Conditions limites

Plusieurs conditions limites sont imposées au modèle pour tenir compte de la symétrie du problème et des déplacements nuls de certains nœuds.

Ainsi, les nœuds se trouvant dans le plan de symétrie de la roue sont bloqués en translation suivant l'axe perpendiculaire à ce plan. D'autre part, certains nœuds spécifiques de la jante correspondant à une zone de soudage sont considérés fixes (figure 3-10).

3.4.2 Pression

La pression constitue le seul cas de chargement appliqué sur la roue. Nous ne considérons pas de force verticale sur la roue correspondant au poids du véhicule, l'essai réel d'explosion ou celui d'éclatement étant réalisés sur une jante fixée à un montage.

Certaines références [64, 75], suggèrent de réaliser le gonflage du pneu à priori et ceci, en deux étapes. La première étape consiste à générer une légère pression de surface sur le pneu de manière à initier le contact entre le pneu et la jante. La pression nominale est ensuite imposée au pneu dans une deuxième étape. Cette méthode permet de créer une précontrainte au pneu.

Dans le cadre de la simulation de l'éclatement du pneu de cette étude, le pneu est d'abord collé à la jante et une pression croissante lui est appliquée, la pression initiale étant nulle. La pression de gonflage est modélisée par une force surfacique sur les éléments à l'intérieur du pneu et à l'extérieur de la jante.

En ce qui concerne la simulation de l'explosion, la pression à l'intérieur du pneu est supposée être égale à 2,76 MPa (400 psi). Cette pression est indiquée implicitement dans la loi de matériau de l'air (cf. chapitre 3) qui donne une information en termes d'énergie pour la propagation de l'onde de choc.

Une valeur aussi basse que 2,76 MPa (400 psi) a été choisie afin de se placer dans les conditions les plus « favorables » d'une explosion. Une explosion peut effectivement s'opérer dès une pression de

cet ordre de grandeur. Ainsi, les résultats issus des simulations d'explosion mettent en évidence le risque minimal associé au phénomène.

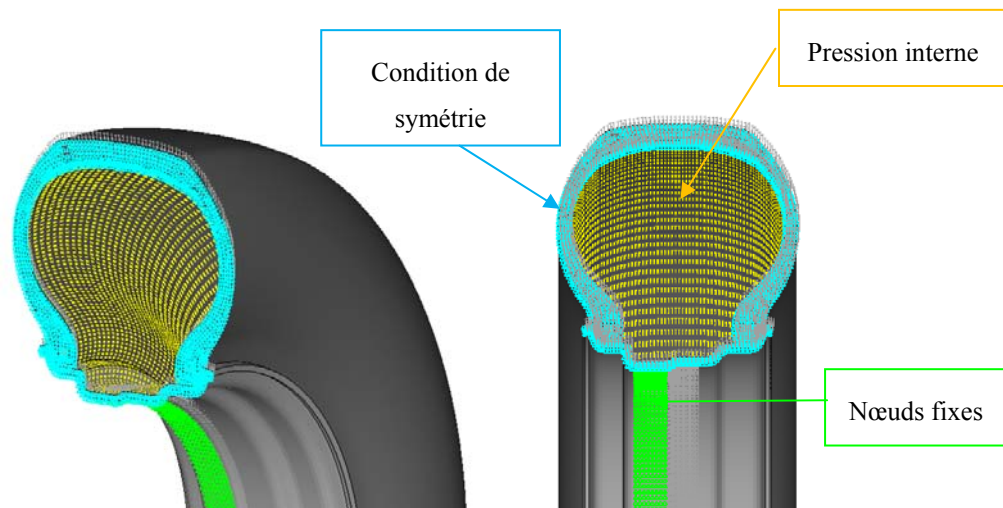


Figure 3-10 Conditions limites et chargement appliqué

CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION DU PHÉNOMÈNE D'EXPLOSION DE PNEU

4.1 Généralités sur le phénomène d'explosion

Le phénomène d'explosion correspond à une libération soudaine et rapide d'énergie pouvant causer des dommages très importants. Lorsqu'une explosion se produit, une onde de choc est générée. Celle-ci résulte d'une « brusque augmentation de pression par déplacement centrifuge d'une mince couche d'air à partir d'un point d'explosion » [77].

L'onde de choc peut être décrite en deux étapes (figure 4-1) :

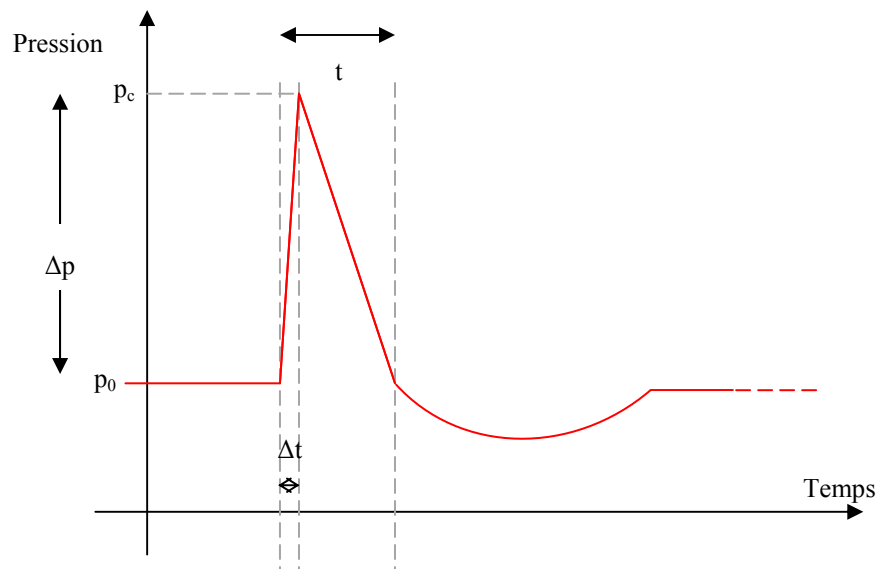


Figure 4-1 Description du phénomène d'onde de choc

Au cours de la première étape, on observe une augmentation brutale de la pression, définie comme l'onde de surpression et se caractérisant par les paramètres suivants :

- p_c : pression de crête
- p_0 : pression initiale
- Δp : niveau de surpression ($\Delta p = p_c - p_0$)

- Δt : durée de la montée à la pression de l'onde de crête
- $\Delta p/\Delta t$: impulsion, elle évalue la vitesse de montée en pression
- t : durée de l'onde de surpression

L'onde de surpression est suivie par une onde dite de dépression ou de détente pour laquelle la pression décroît et devient inférieure à la pression initiale.

Les effets d'une explosion dépendent principalement de deux facteurs : la quantité d'énergie de détonation libérée et la distance par rapport à l'explosion.

4.2 Simulation d'une explosion de pneu par la méthode des éléments finis

Afin de comprendre et prédire le comportement du pneu lors d'une explosion, il est intéressant de simuler le phénomène à l'aide d'un logiciel d'éléments finis utilisant un schéma explicite. Puisqu'un tel modèle exige des pas de temps très faibles (et donc de nombreuses itérations) pour s'assurer de la stabilité de la solution, il est conseillé pour les phénomènes d'impact ou des événements de très courte durée. On tirera ainsi profit des possibilités de calculs permises par le logiciel Altair Radioss.

4.2.1 Description du modèle

Pour simuler une telle explosion, un modèle est créé avec le logiciel Altair Hypermesh. Le modèle se compose d'une charge explosive TNT placée à l'intérieur d'un pneu, lui-même monté sur sa jante. L'air est modélisé à l'intérieur et à l'extérieur du pneu et une frontière ou « *silent boundary* » limite l'air extérieur. Compte-tenu de la symétrie du problème, seul la moitié de la roue est modélisée. La géométrie et les propriétés du pneu sont celles qui ont été énoncées dans le chapitre précédent.

Le choix de la charge TNT pour simuler l'augmentation soudaine de pression n'est pas anodin. En effet, un mélange explosif a été utilisé lors d'essais préliminaires au LCRE pour générer une explosion. Cette charge permet en plus de créer une explosion dont l'origine est localisée et dont l'intensité peut être contrôlée.

La frontière entourant l'air extérieur permet d'éviter les réflexions de bord et le libre passage de la propagation de l'onde de choc. Plus de détails à ce propos sont donnés au paragraphe 4.2.4.3.

La géométrie du modèle est illustrée à la figure 4-2.

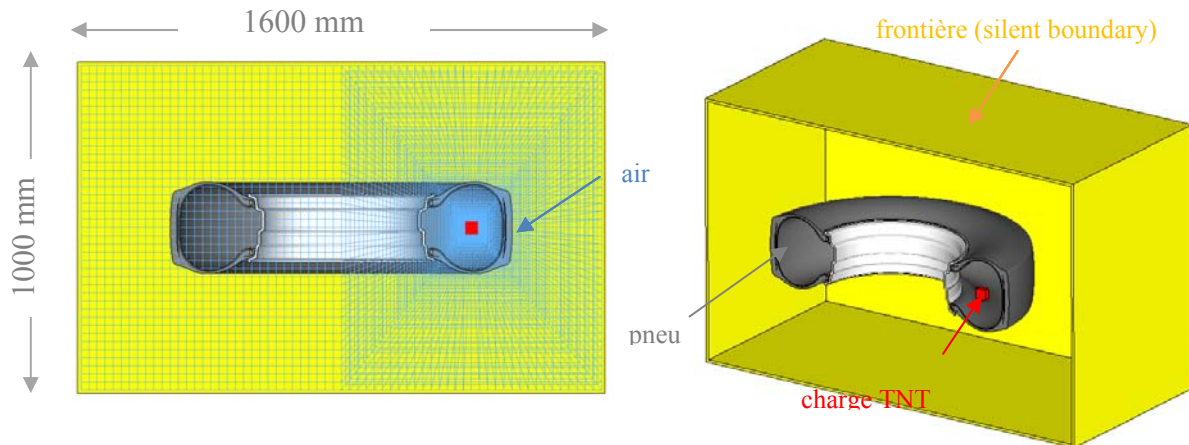


Figure 4-2 Description du modèle

La simulation du phénomène d'explosion fait intervenir des éléments fluides (air et frontière) et solides (charge explosive, pneu, tringles, nappes et jante). Les maillages fluide et solide ne sont pas coïncidents et sont construits indépendamment l'un de l'autre. La formulation *Arbitrary Lagrangian Eulerian* (ALE) permet de tenir compte de l'interaction fluide – structure. Le paragraphe 4.2.3 est consacré à cette formulation.

Au vue des caractéristiques de propagation de l'onde de choc, un maillage très fin est exigé pour la charge explosive et les éléments se trouvant à proximité de celle-ci. Les maillages de l'air et de la charge explosive sont, eux coïncidents [78] et une maillage progressif (au sens de la taille des éléments) de l'air est adopté par l'intermédiaire d'un « biasing » (figure 4-3).

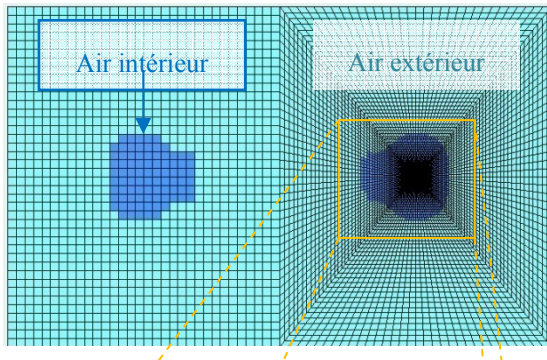


Figure 4-3 Maillage de l'air

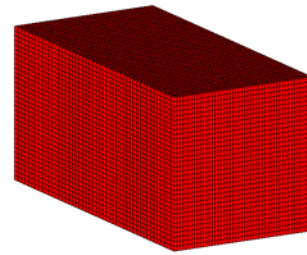


Figure 4-4 Maillage de la charge explosive

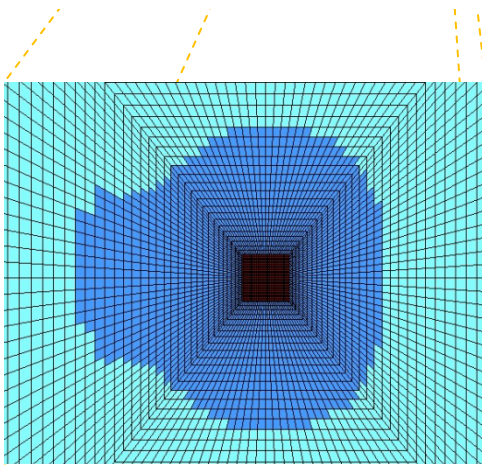


Figure 4-5 Détail du maillage de l'air à proximité de la charge explosive

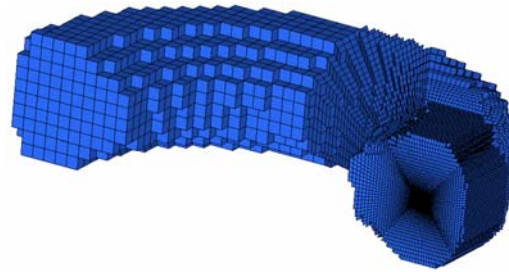


Figure 4-6 Maillage de l'air intérieur

Les éléments constituant la charge explosive, l'air et la frontière sont modélisés avec des éléments solides hexaédriques ou tétraédriques avec la propriété SOLID dans Radioss.

Au final, le modèle ne compte pas moins de 516300 éléments. Ces derniers se répartissent comme suit parmi les différents composants :

Tableau 4-1 Propriétés, nombre et type d'éléments utilisés pour le maillage

	Matrice caoutchouc	Nappes	Tringles	Jante	Charge	Air intérieur	Air extérieur	Frontière
Nombre d'éléments	107200	28000	1600	36300	38400	112354	183646	8800
Type d'éléments	Hexa & Tétra	Quad	Hexa	Hexa	Hexa	Hexa & Tétra	Hexa & Tétra	Hexa
Propriétés	SOLID	SH_ORTH	SOLID	SOLID	SOLID	SOLID	SOLID	SOLID

4.2.2 Schéma explicite

Une explosion est un phénomène complexe qui requiert des techniques de simulation adaptées. Les méthodes de simulation classiques utilisant un schéma implicite ne suffisent pas à résoudre des problèmes d'une si courte durée de façon précise. Il est alors nécessaire de recourir à un logiciel utilisant un schéma explicite tel que Radioss. Pour comprendre l'intérêt de la méthode explicite, il est essentiel de savoir différencier les méthodes explicite et implicite. Des détails concernant ces deux méthodes figurent en annexe 5.

4.2.3 Formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)

Afin de calculer l'interaction entre l'air et la structure du pneu, l'algorithme *Arbitrary Lagrangian Eulerian* est utilisé dans le code Radioss.

Pour cela, la charge explosive, l'air et la frontière sont modélisés avec un maillage eulérien tandis que la jante et le pneu sont modélisés avec un maillage lagrangien. Dans le cas d'une formulation lagrangienne, le maillage bouge et se déforme avec le matériau. L'interface entre les matériaux et les surfaces libres correspondent aux limites des éléments. La figure 4-7-a illustre le mouvement des matériaux et du maillage à deux instants. Ce maillage est particulièrement recommandé pour les éléments solides.

En ce qui concerne la formulation eulérienne, le maillage est fixé dans l'espace et les matériaux se déplacent à travers le maillage. Le maillage étant fixe, il n'y a pas de problème de distorsion en cas de larges déformations. Le déplacement des matériaux à travers le maillage et le calcul de l'interface entre les matériaux fait appel à diverses techniques numériques. La figure 4-7-b illustre le mouvement des matériaux et du maillage dans le cas de la méthode eulérienne. Cette méthode est typiquement utilisée pour décrire les fluides et les gaz.

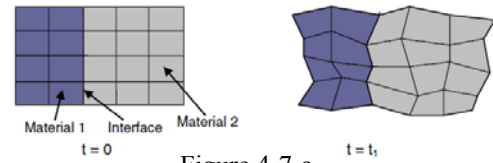


Figure 4-7-a

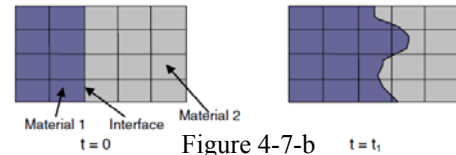


Figure 4-7-b

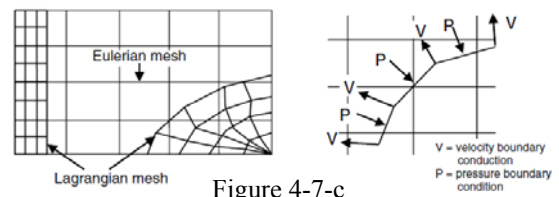


Figure 4-7-c

L'algorithme ALE combine les avantages des deux formulations précédentes et facilite la modélisation de problème impliquant les interactions fluide - structure.

Figure 4-7 Formulations eulérienne (a), lagrangienne (b) et ALE (c)

Dans ces conditions, l'observateur peut suivre des points se déplaçant dans l'espace [79].

4.2.4 Paramètres de simulation

4.2.4.1 Charge explosive

Le comportement de la charge explosive est décrit par l'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee (JWL) qui a été caractérisée pour de nombreux explosifs. De nombreuses équations d'état ont été proposées pour caractériser le comportement des produits explosifs, des équations d'état purement théoriques jusqu'aux équations d'état reposant sur des essais expérimentaux [80].

L'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee (JWL) est une expression mathématique empirique décrivant la relation pression-volume associée aux produits chimiques explosifs [63].

L'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee est la formulation la plus commune puisqu'elle ne nécessite que six paramètres et représente relativement bien les essais expérimentaux. De plus, une base de

données expérimentales importante est disponible pour de nombreux explosifs. L'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee définit la pression p comme :

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1} V\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2} V\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (4.1)$$

où A , B , R_1 , R_2 et ω sont des constantes dépendantes de la charge explosive, p est la pression, V est le volume spécifique et E est l'énergie spécifique.

Le matériau défini par la loi 5 (/MAT/LAW5 (JWL)) dans Radioss est attribué à la charge TNT. Cette loi exige en plus des paramètres cités précédemment, la densité ρ de la charge, la vitesse de détonation V_d et la pression de Chapman-Jouguet p_{CJ} . Cette dernière réfère généralement à la pression de détonation.

L'ensemble des paramètres caractérisant la charge explosive TNT [63] figure dans le tableau suivant :

Tableau 4-2 Paramètres utilisés dans l'équation d'état de Jones-Wilkins-Lee

ρ (kg.m ⁻³)	V_d (m.s ⁻¹)	p_{CJ} (GPa)	A (GPa)	B (GPa)	R_1	R_2	ω	E (GPa)
2187,5	6930	22	371,2	3,74	4,15	0,90	0,35	6

Dans le modèle, les dimensions de la charge explosive sont 40 mm x 40 mm x 20 mm. Selon [63], la quantité de charge explosive souhaitée peut être obtenue de deux manières : en modifiant les dimensions de la charge et en conservant la masse volumique de TNT ou en modifiant la masse volumique de la charge tout en conservant les dimensions de la charge. La deuxième solution a été

choisie pour obtenir l'équivalent de 140 g de TNT. Il s'agit en effet de la quantité équivalente de TNT utilisée lors des essais d'explosion au LCRE.

4.2.4.2 Air

Le comportement de l'air est modélisé via la loi hydrodynamique. Il s'agit de la loi 6 dans Radioss qui est implémentée dans le matériau MAT/LAW6/(HYDRO). Cette loi est particulièrement adaptée pour modéliser les fluides et les gaz.

L'équation utilisée pour définir le matériau est :

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu) E_0 \quad (4.2)$$

où $C_{0,...,5}$ sont des constantes, E_0 est l'énergie spécifique et $\mu = \rho/\rho_0 - 1$.

ρ_0 et ρ sont respectivement les densités initiale et courante de l'air.

L'air est souvent modélisé comme un gaz parfait [78]. Un gaz parfait autorise la compressibilité, l'expansion et la contraction avec une augmentation de température [74]. Sous cette hypothèse, les coefficients C_0 , C_1 , C_2 et C_3 sont nuls tandis que $C_4 = C_5 = \gamma - 1$, γ étant la constante des gaz parfaits ($\gamma = 1,4$). De plus, $E_0 = p_0 / (\gamma - 1)$ où p_0 est la pression initiale de l'air.

Dans le cas d'un gaz parfait, la loi hydrodynamique s'écrit:

$$p = (C_4 + C_5 \mu) E_0 = (\gamma - 1) E_0 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (4.3)$$

Puisque l'air intérieur du pneu et celui extérieur au pneu ont des pressions initiales différentes (donc des énergies différentes), deux matériaux distincts leur sont attribués. Les paramètres adoptés pour les simulations numériques figurent dans le tableau 4-3:

Tableau 4-3 Paramètres de l'air

	$\rho_0 (\text{g.cm}^{-3})$	$C_4=C_5$	$E_0 (\text{GPa})$	$p_0 (\text{MPa})$
Air intérieur	$1,189.10^{-3}$	0,4	$6,9 \cdot 10^{-3}$	2,76
Air extérieur	$1,189.10^{-3}$	0,4	$2.5 \cdot 10^{-4}$	0,1

L'air intérieur et l'air extérieur sont ici supposés avoir la même masse volumique. De plus, l'influence de la température de l'air n'est pas considérée.

4.2.4.3 Frontière de l'air

La frontière de l'air est modélisée géométriquement et un matériau lui est attribué dans Radioss (MAT/LAW11 (BOUND)). La loi 11 est utilisée en particulier pour les analyses en présence de fluide. Cette frontière permet d'éviter les réflexions d'ondes aux bords du maillage de l'air.

Elle se comporte comme un filtre passe-bas [81]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \rho c \left(\frac{\partial}{\partial t} (V_n) - V_n \cdot \text{div}(\vec{V} - V_n \cdot \vec{n}) \right) + c \frac{(p_\infty - p)}{2 \cdot l_c} \quad (4.4)$$

dont la fréquence de coupure f_c est : $f_c = c/(4\pi l_c)$.

- l_c est une longueur caractéristique appelée aussi « gap » ($l_c = 1,5 \times$ taille de l'élément fluide)

- c correspond à la vitesse du phénomène étudié

4.2.4.4 Interface fluide - structure

Pour tenir compte de l'interaction fluide - structure, une interface entre l'air et le pneu doit être créée. Il s'agit de l'interface 18 (INTER/TYPE18) dans Radioss.

Plus précisément, l'interface crée un contact entre les nœuds eulériens et les surfaces de type lagrangien.

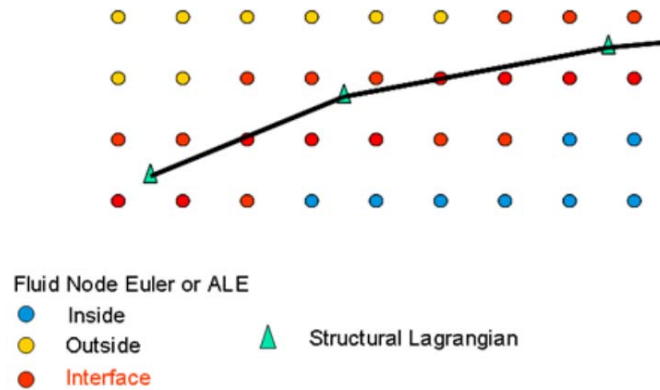


Figure 4-8 Principe de l'interface 18

La qualité des résultats de la simulation utilisant cette interface dépend grandement des paramètres de l'interface et en particulier la rigidité de l'interface.

La rigidité d'interface recommandée en cas d'interaction fluide-structure est déterminée à partir de la formule suivante [74]:

$$St_{\text{fac}} = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot S_{\text{el}}}{Gap} \quad (4.5)$$

où :

- ρ : densité du fluide
- v : vitesse du phénomène (vitesse du son ou plus élevé pour les phénomènes supersoniques)
- S_{el} : surface des éléments lagrangiens
- $Gap = 1,5 \times \text{taille de l'élément fluide}$

Les paramètres utilisés pour définir l'interface 18 sont rassemblés dans le tableau 4-4:

Tableau 4-4 Paramètres de l'interface 18

ρ (kg.m ⁻³)	v (m.s ⁻¹)	S_{el} (m ²)	Gap (mm)	St_{fac} (kg.ms ⁻²)
1,189	6930	$4,3 \cdot 10^{-5}$	13	0,19

4.2.4.5 Condition de rupture des éléments

Pour simuler la rupture du pneumatique, une condition de rupture est attribuée aux éléments de la matrice en caoutchouc. Outre l'identification du mode de rupture, ceci permet d'observer la projection de fragments.

Le modèle de rupture par déformation maximale fut adopté dans les simulations d'explosion. Dans ce modèle, un facteur d'endommagement $D = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}$ est appliqué lorsque la déformation principale ε_1 atteint la valeur ε_{t1} de manière à réduire la contrainte du matériau considéré (figure 4-9). L'élément est supprimé lorsque $D = 1$.

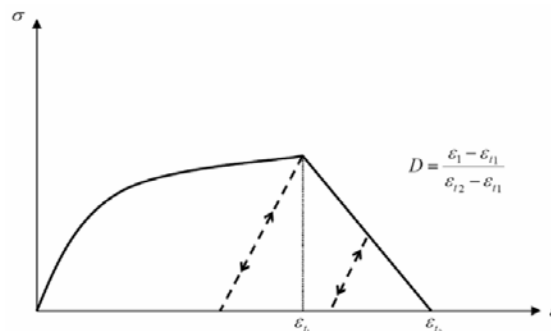


Figure 4-9 Modèle de rupture par déformation maximale

4.2.5 Résultats de la simulation d'explosion

Avec les paramètres de simulation décrits précédemment, l'analyse numérique menée avec Altair Radioss permet de mieux appréhender le comportement du pneu lors de l'explosion. Elle permet entre autres d'apporter de nouvelles informations en termes de pression, de vitesse et de déplacement de l'onde de choc. Les résultats sont donnés pour une pression à l'intérieur du pneu de 2,76 MPa (400 psi).

Les résultats nécessaires à la compréhension du phénomène sont énoncés dans les paragraphes suivants. L'analyse de ces résultats exige au préalable l'identification des plans de symétrie et certains nœuds du modèle. Ces derniers sont respectivement mis en évidence à la figure 4-10 et à la figure 4-11.

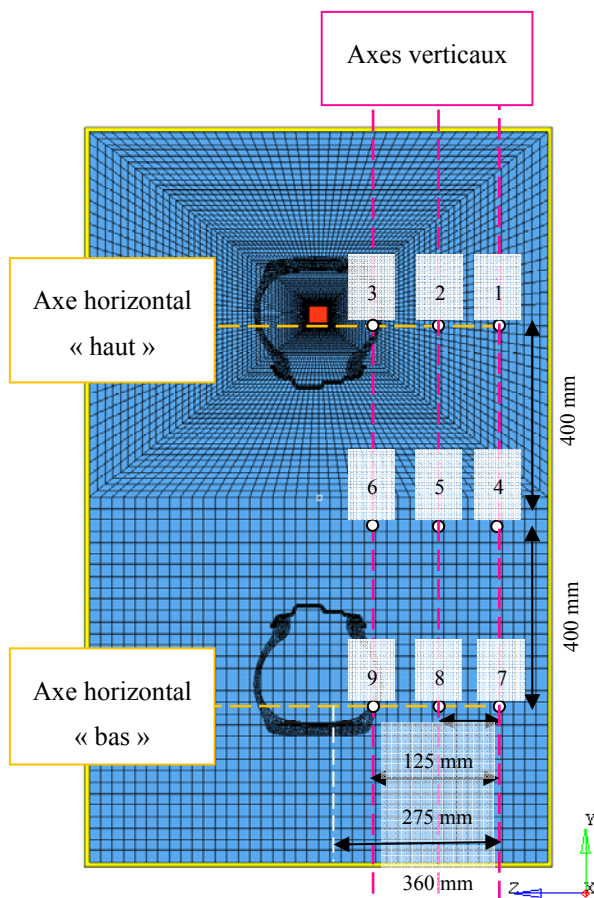


Figure 4-10 Identification de certains nœuds et axes du modèle

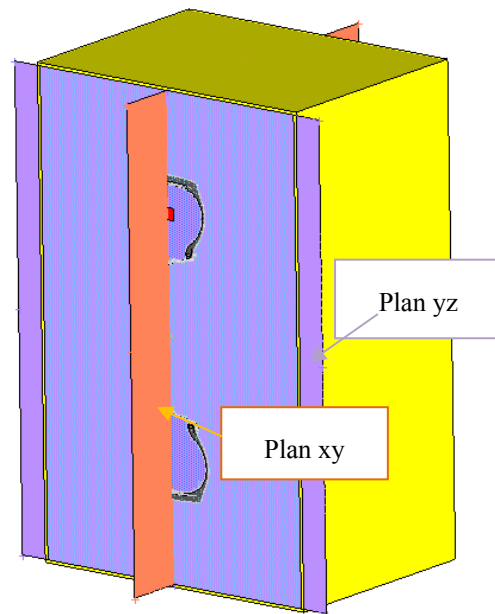


Figure 4-11 Plans de symétrie du modèle

4.2.5.1 Mode de rupture

Avec la condition de rupture basée sur les déformations maximales de la matrice en caoutchouc, les résultats de la simulation indiquent une amorce de la rupture au niveau des deux flancs, à 180 ° par rapport à la charge explosive. Le pneu se déchire ensuite sur toute sa circonférence en bas du flanc.

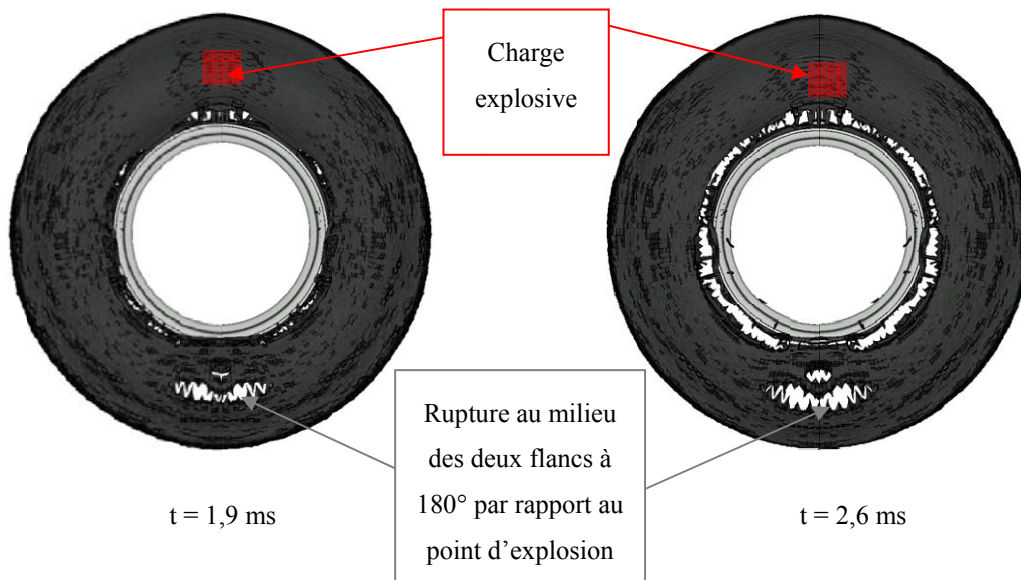


Figure 4-12 Rupture du pneu par la méthode des éléments finis

À titre d'exemple, un mode de rupture similaire a été observé lors de l'accident survenu sur l'engin de mine Caterpillar 793 à la mine Radomiro Tomic au Chili en 2000 [21].



Figure 4-13 Rupture du pneu lors de l'accident survenu à la mine Radomiro Tomic

4.2.5.2 Vitesse et direction des fragments

D'un point de vue sécuritaire, il est intéressant de connaître la vitesse et la direction des fragments projetés lors de l'explosion. La figure 4-14 donne des informations sur la vitesse et la direction des fragments à $t = 5$ ms. Les fragments naissent de la suppression des éléments voisins et les premiers d'entre eux apparaissent de part et d'autre des deux flancs après 2,01 ms.

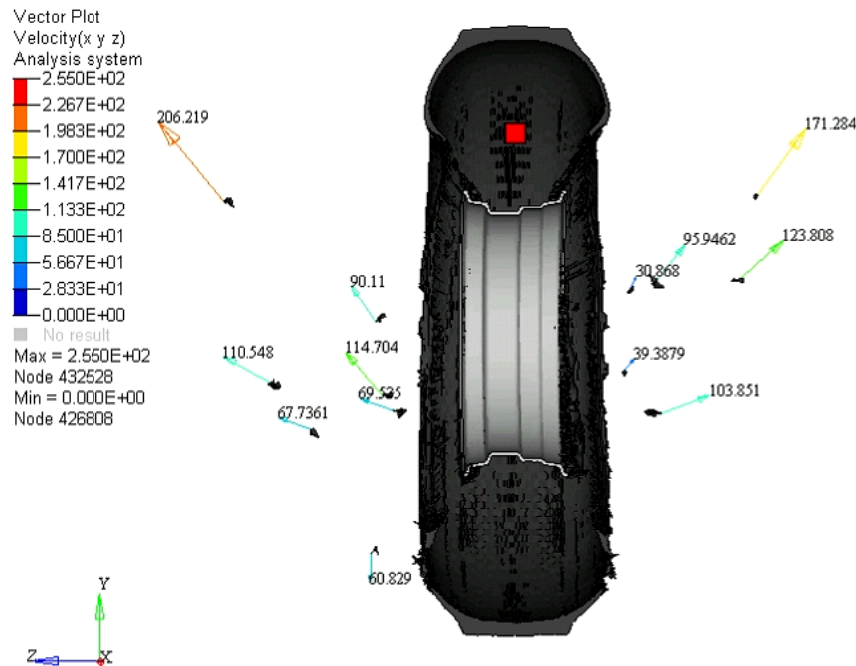


Figure 4-14 Vitesse et direction des fragments à $t = 5$ ms

Ces fragments sont susceptibles de provoquer de graves blessures ou endommager des structures puisqu'ils sont projetés à très grande vitesse. Malgré leur faible masse, ces fragments possèdent une énergie très importante puisque l'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse. Les résultats indiquent que la vitesse maximale atteinte par les fragments est de 255 m/s (918 km/h !) à $t = 3,62$ ms. On remarque également que les fragments sont projetés selon une direction ayant un grand angle par rapport à l'axe z. Cette direction privilégiée résulte de la direction de propagation de l'air après la rupture (cf. paragraphe suivant).

4.2.5.3 Propagation de l'onde de choc

Les images présentées à la figure 4-15 illustrent la propagation de l'onde de choc dans les plans xy et yz (cf. figure 4-11 pour l'identification des plans). L'onde de pression se déplace circonférentiellement à l'intérieur du pneu à partir du point d'explosion. La rupture du pneu au point diamétralement opposé à ce point provoque ensuite une libération soudaine de l'air des deux côtés des flancs (figures du bas). Cet air se déplaçant à grande vitesse ne s'échappe pas suivant une direction parfaitement rectiligne selon l'axe z mais plutôt selon une direction courbe vers le centre du pneu.

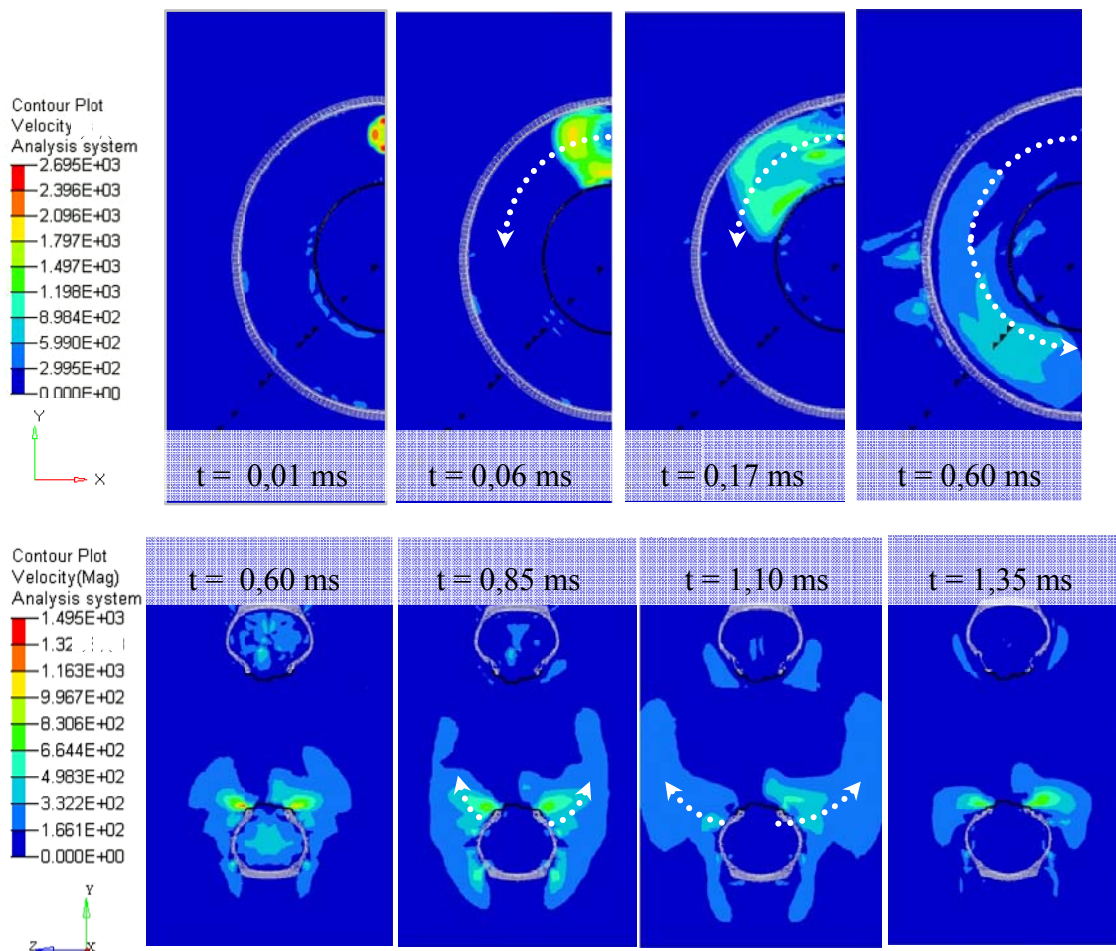


Figure 4-15 Propagation de l'onde de choc dans les plans xy (haut) et yz (bas)

4.2.5.4 Pression de l'air extérieur

La figure 4-16 et la figure 4-17 représentent respectivement l'évolution temporelle de la pression de l'air extérieur sur l'axe vertical C et sur l'axe horizontal du bas. Si besoin, ces axes sont identifiés à la figure 4-10 de la page 67. L'axe C a été privilégié par rapport aux axes A et B car il est le plus éloigné du pneu. Situé à environ 36 cm de ce dernier, il est plus représentatif pour l'évaluation du risque associé à l'explosion. En pratique, une distance minimale est observée entre le pneu et la victime. Sur un axe horizontal, c'est l'axe du bas qui a été choisi puisque la rupture du pneu est observée dans cette zone.

Parmi les 3 nœuds identifiés sur l'axe vertical C (figure 4-10), le nœud 4 se trouvant au milieu de l'axe est le nœud pour lequel la pression maximale est observée. La pression la plus faible est observée au nœud 1 situé à proximité de la charge explosive. Ces résultats sont cohérents avec la direction de propagation de l'air observée dans le plan yz (figure 4-15).

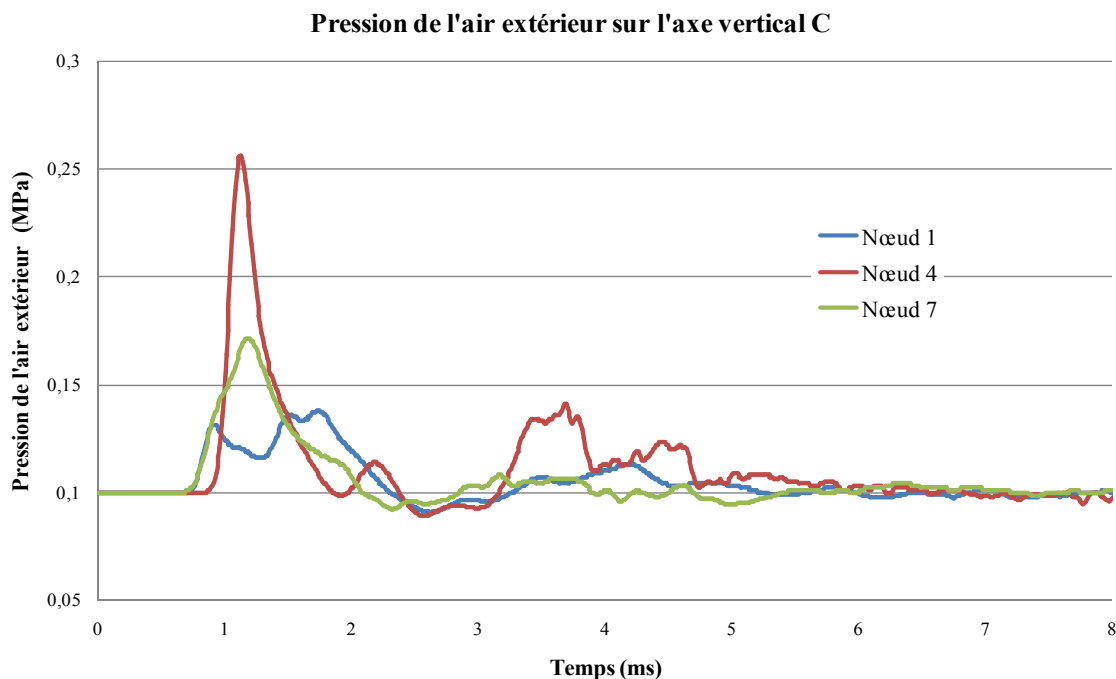


Figure 4-16 Évolution temporelle de la pression de l'air extérieur aux nœuds 1, 4 et 7

La surpression observée au nœud 7 (figure 4-10), évaluée à environ 0,16 MPa (23,2 psi), est considérable. Cette surpression équivaut par exemple à la pression exercée par une masse de 320 kg sur une surface de 200 cm². Pour une personne se trouvant à proximité du pneu, une telle surpression peut être fatale.

Évaluons désormais l'évolution temporelle de la pression sur l'axe horizontal du bas où la brusque libération d'énergie est observée. Durant les deux premières millisecondes, les nœuds 7, 8 et 9 (figure 4-10) appartenant à cet axe enregistrent successivement un pic de pression. Le décalage temporel des pics de pression correspond évidemment au temps nécessaire à l'onde pour parcourir la distance entre deux nœuds successifs. On note que la valeur maximale de chacun des pics diminue avec la distance par rapport au pneu. La pression diminue par exemple de 19 % sur une distance de 25,5 cm, passant d'environ 0,21 MPa (30,5 psi) au nœud 9 à 0,17 MPa (24,7 psi) au nœud 7. En toute logique, la pression diminue fortement en s'éloignant du pneu.

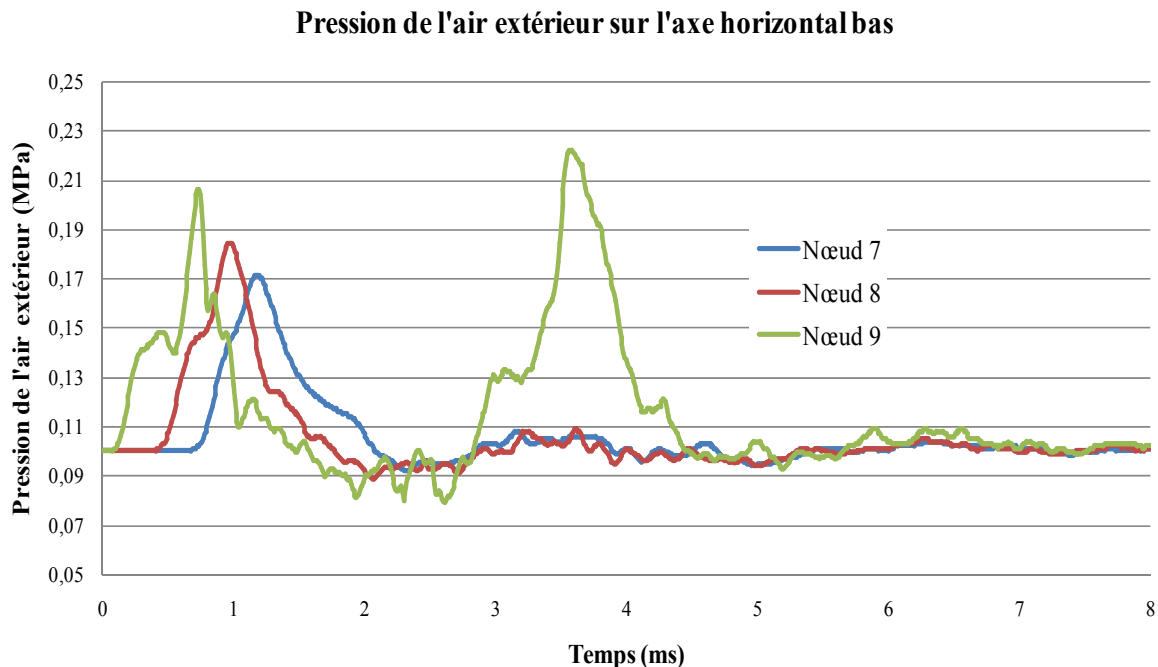


Figure 4-17 Évolution temporelle de la pression de l'air extérieur aux nœuds 7, 8 et 9

On remarque également un autre pic de pression au nœud 9 à environ 3,7 ms alors qu'aucun autre pic de pression n'est observé aux nœuds 7 et 8 par la suite. À cet instant, le pneu est tellement déformé que le nœud 9 (qui lui est fixe) se trouve à l'intérieur du pneu où la pression reste bien plus élevée que la pression extérieure.

4.2.5.5 Vitesse de l'air extérieur

Les évolutions temporelles de la vitesse de l'air extérieur sur l'axe vertical C et l'axe horizontal du bas sont illustrées respectivement à la figure 4-18 et la figure 4-19.

Des considérations similaires à celles mises en lumière dans l'analyse de pression peuvent être faites.

Sur l'axe vertical C, la vitesse maximale de l'air est encore mesurée au nœud 4 alors que la vitesse minimale l'est au nœud 1. Les vitesses impliquées dans le phénomène sont encore une fois considérables puisqu'elles atteignent près de 1000 km/h au nœud 4. Une différence notable peut être notée entre les vitesses atteintes aux nœuds 4 et 1. À ce dernier point, la vitesse maximale est « seulement » de 400 km/h.

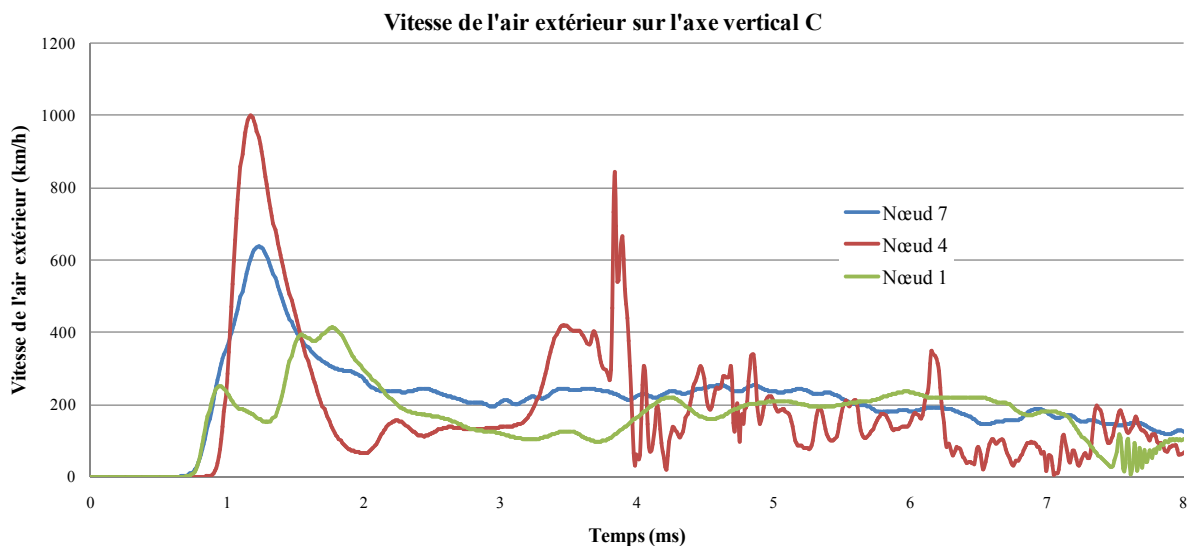


Figure 4-18 Évolution temporelle de la vitesse de l'air extérieur aux nœuds 1, 4 et 7

De même que pour la pression, trois pics de vitesse décalés dans le temps sont observés aux nœuds 7, 8 et 9. Là aussi, la vitesse diminue en s'éloignant du pneu.

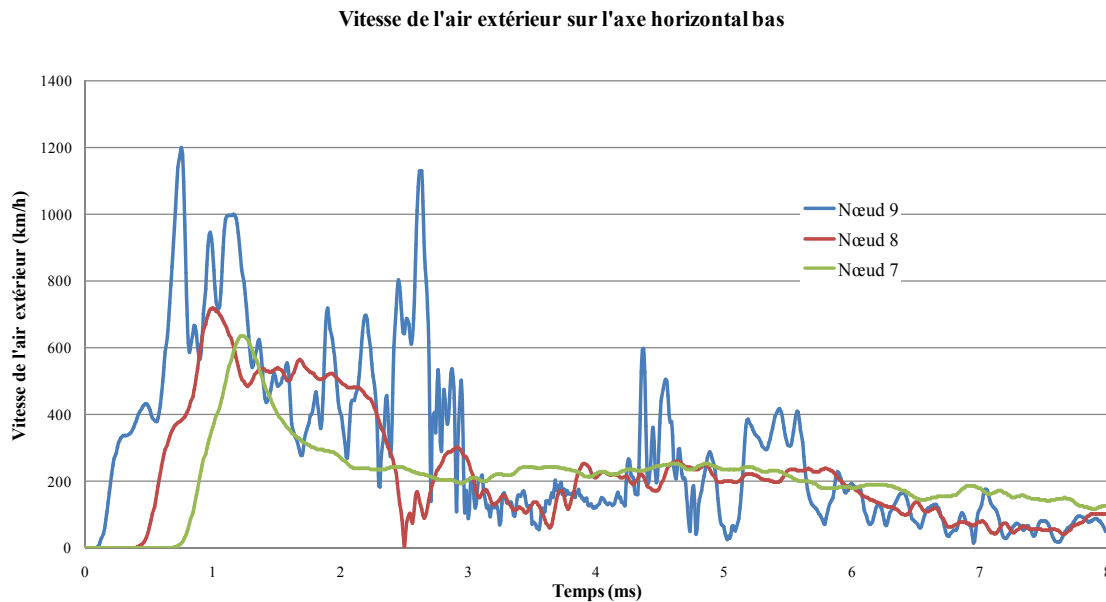


Figure 4-19 Évolution temporelle de la vitesse de l'air extérieur aux nœuds 7, 8 et 9

Si les résultats précédents, qu'ils soient en termes de pression ou de vitesse, se veulent d'abord qualitatifs, ils donnent une idée du risque associé au phénomène d'explosion. Et au vu de l'ordre de grandeur de ces valeurs, le risque est considérable.

4.2.6 Mécanismes de rupture du pneumatique

Dans un rapport consacré aux explosions de pneus d'engins de l'industrie minière [47], la compagnie OTRACO envisage le scénario suivant pour expliquer le mode de rupture d'un pneu à la suite d'une explosion.

L'onde de pression résultant d'un mélange explosif gazeux aux concentrations particulières se déplace circonférentiellement dans deux directions à partir du point d'initiation. Les deux fronts d'onde se rencontrent au point diamétralement opposé à ce point (180° par rapport au point d'initiation) et leur rencontre y provoque la rupture du pneumatique au niveau des deux flancs.

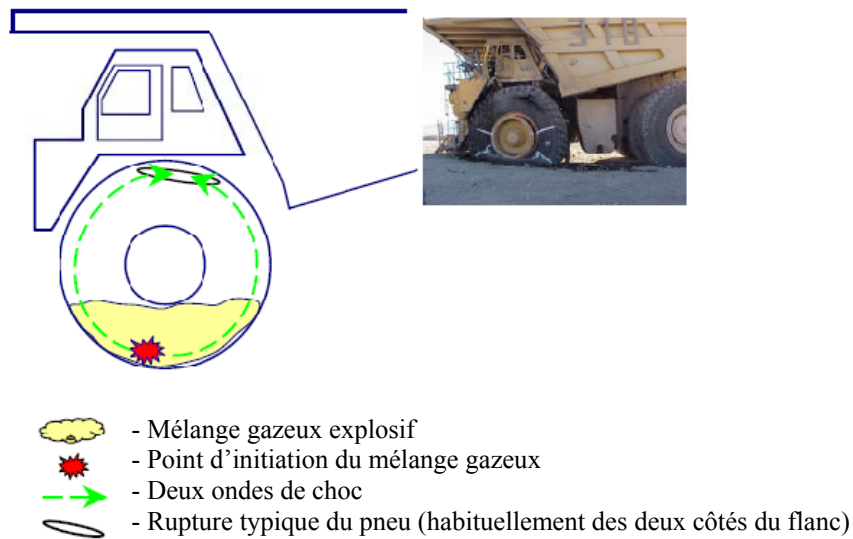


Figure 4-20 Scénario conduisant à la rupture du pneu

Les résultats des simulations numériques semblent valider le scénario envisagé par cette étude. La propagation de l'onde de choc et le mode de rupture obtenus par l'analyse numérique correspondent effectivement à ceux énoncés dans ce rapport. Les simulations donnent tout de même des informations supplémentaires quant à l'évacuation soudaine de l'air et la vitesse des débris résultant de l'explosion.

Lorsque le pneu rompt au niveau des flancs, un important déplacement d'air se produit à très grande vitesse à proximité de la zone de rupture. Les vitesses atteintes par l'air (près de 1000 km/h) et les fragments (plus de 900 km/h) sont suffisantes pour provoquer des dommages sévères voire même la mort à toute personne se trouvant à proximité du pneu.

4.2.7 Considérations sur la simulation d'explosion par la méthode des éléments finis

La simulation d'une explosion de pneu n'est pas chose facile en raison :

- de la simulation elle-même

Le modèle comporte plusieurs difficultés déjà mentionnées (grandes déformations, caoutchouc au comportement hyper élastique, structures composites, interface fluide – structure, pas de temps très faibles) qui sont souvent la source d'un arrêt prématuré de la simulation.

- du manque de données expérimentales

Peu de données expérimentales sont accessibles pour confirmer la validité du modèle numérique. Il reste aussi à trouver la ou les conditions de rupture adéquates pour représenter l'explosion d'une manière plus fidèle.

Des essais expérimentaux visant à reproduire une explosion de pneu sont présentés dans les deux prochains paragraphes. Cependant, ceux-ci n'ont pas permis d'obtenir toutes les données et les informations pertinentes pour pouvoir établir une comparaison avec les résultats des simulations numériques.

C'est pourquoi les résultats issus des simulations se veulent d'abord qualitatifs. Ils permettent de comprendre le phénomène dans sa globalité mais les valeurs numériques qui y sont avancées doivent être considérées avec prudence. Malgré cette restriction, il aurait été intéressant d'évaluer l'influence de certains paramètres comme la quantité de charge TNT ou la pression de l'air à l'intérieur du pneu. Les valeurs de ces deux paramètres sont difficiles à établir puisque les explosions peuvent survenir à des pressions et des concentrations en gaz explosifs très diverses.

4.2.8 Essai préliminaire en chambre d'explosion

Un premier essai d'explosion de pneu a été réalisé dans une chambre d'explosion du LCRE afin notamment d'évaluer l'importance du bruit et du risque associé à l'explosion. (Les essais effectués en extérieur ne doivent pas dépasser un seuil de bruit au delà d'une zone déterminée).

Cet essai préliminaire consiste en l'application d'un mélange gazeux explosif à l'intérieur du pneu et est par conséquent similaire aux simulations d'explosion par éléments finis. Le pneu, dans sa position verticale, est fixé à un support. La puissance de cette explosion a été évaluée à 140g de TNT par les experts du LCRE.



Figure 4-22 Chambre d'explosion du
LCRE



Figure 4-21 Le pneu, dans sa
position verticale, est fixé à un
support



Figure 4-23 Pneu après l'explosion

Le tube reliant le capteur de pression ayant rompu lors de l'explosion, que peu de données n'ont été recueillies lors de cet essai préliminaire. La comparaison avec les résultats des simulations numériques est, de fait, très limitée. Un capteur de pression se trouvant dans la chambre d'explosion a toutefois mesuré une augmentation de la pression de 20 psi à 3 m du pneu.

4.3 Essai d'explosion de pneus au LCRE

Avant de réaliser des essais d'explosion en conditions réelles (essais sur piste prévus au cours de l'année 2011), des essais d'explosion de pneu ont été réalisés sur un site sécuritaire au Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs (LCRE) à Ottawa, Canada. Cette première étape vise à mettre au point la méthodologie expérimentale et déterminer les mesures de sécurité à adopter lors des essais sur piste. Cet essai nécessite l'élaboration d'un montage expérimental

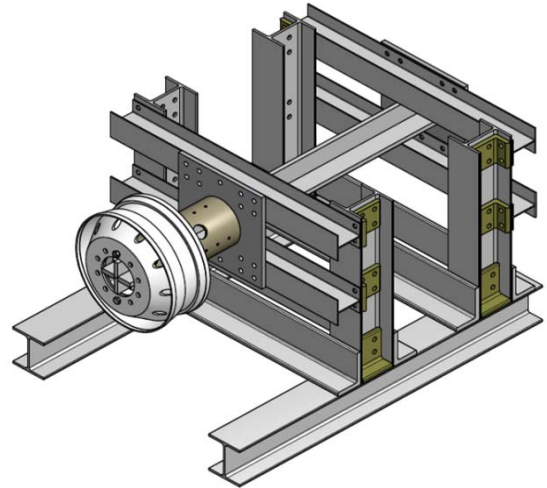


Figure 4-24 Schéma du montage expérimental utilisé au LCRE

(figure 4-24) où le pneu, monté sur la jante, est solidement fixé à une base. Le but de cette première phase est de fournir des données de pression et de température en plusieurs points du pneu pour tracer leur évolution temporelle. D'autre part, des échantillons de gaz produits lors du phénomène d'explosion ainsi que des échantillons de caoutchouc en plusieurs sections sont collectés.

Trois pneus neufs de taille 11R22.5 et de type radial ont été utilisés pour cet essai.

4.3.1 Montage expérimental

Le premier essai de type destructif utilise un montage installé sur le site extérieur sécuritaire du LCRE. Des photographies de ce montage sont présentées à la figure 4-25 et le schéma du montage complet avec l'ensemble des capteurs figure en annexe 6.

Ce montage a été conçu de manière à reproduire les phénomènes dangereux menant à l'explosion du pneu.

Pour ce faire, le montage a été envisagé comme tel :

- le pneu est monté sur la jante, elle-même fixée au tambour de frein
- le tout est solidement fixé à un lourd bloc de fixation
- un système de chauffage par induction permet l'apport de chaleur au tambour
- des capteurs de pression sont installés à l'intérieur du pneu
- des capteurs de température sont installés en plusieurs points du tambour, de la jante et du pneu. La température de l'air à l'intérieur du pneu est aussi mesurée.
- l'échantillonnage des gaz se fait à l'aide d'un tube fixé à un connecteur lui-même soudé sur la jante.
- une chaîne d'acquisition de données par télémétrie est utilisée en complément puisque cette méthode de mesure sera employée lors des essais sur piste.
- une caméra haute vitesse synchronisée avec le système d'acquisition filme l'explosion.

L'emploi d'une caméra thermique n'a pas été jugé utile pour apprécier la distribution de température sur la jante et les surfaces du pneu. Selon [48], son prix élevé et son utilisation peu conviviale ne peuvent favoriser son emploi pour la détection d'un éclatement ou d'une explosion.

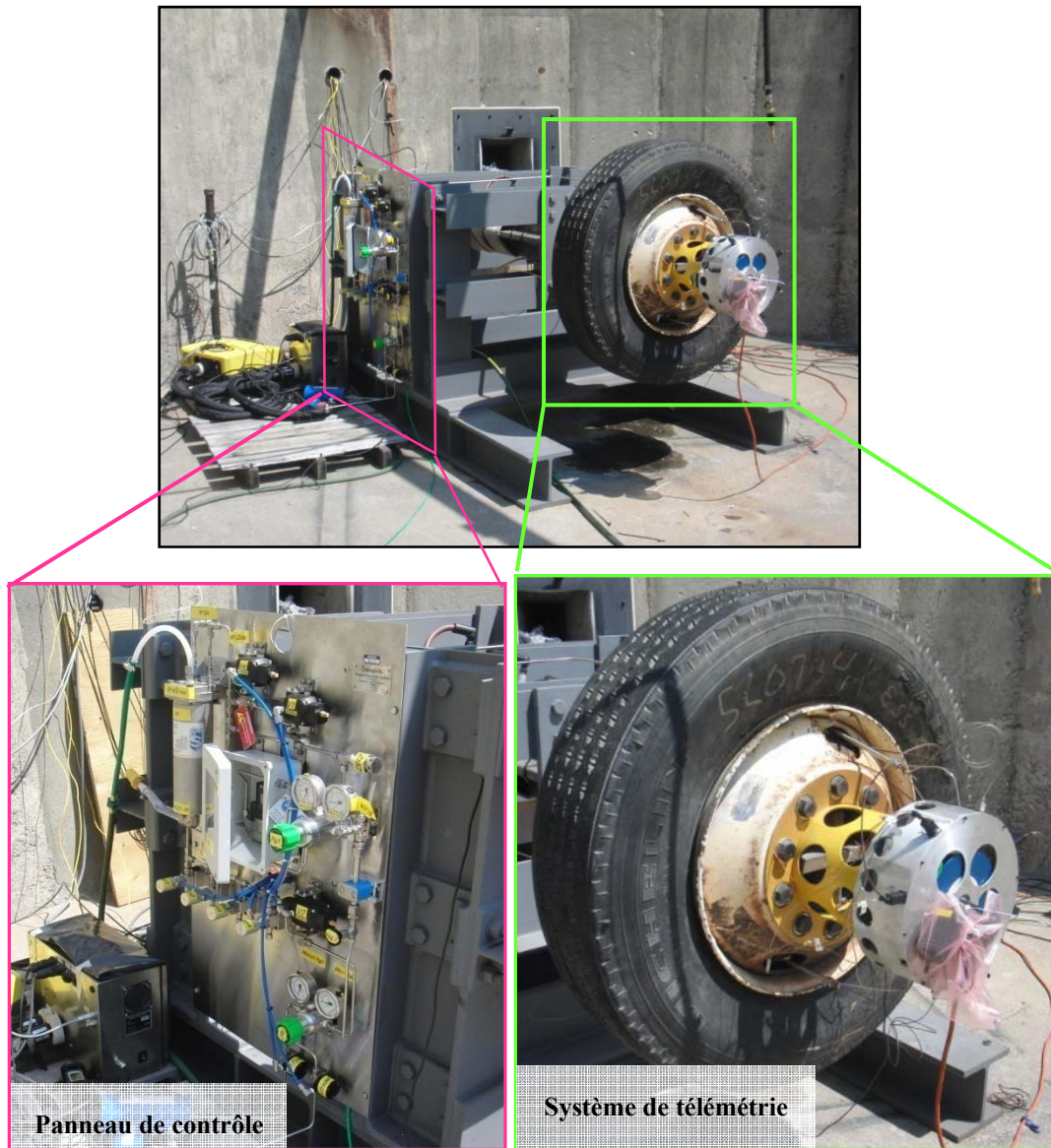


Figure 4-25 Montage expérimental utilisé au LCRE lors des essais d'explosion

4.3.2 Résultats des essais d'explosion réalisés au LCRE

4.3.2.1 Rupture des pneus

À première vue, les trois essais n'ont pas permis de reproduire une explosion puisque les ruptures observées sont plutôt celles d'un éclatement. Des ruptures différentes ont été observées lors des trois essais.

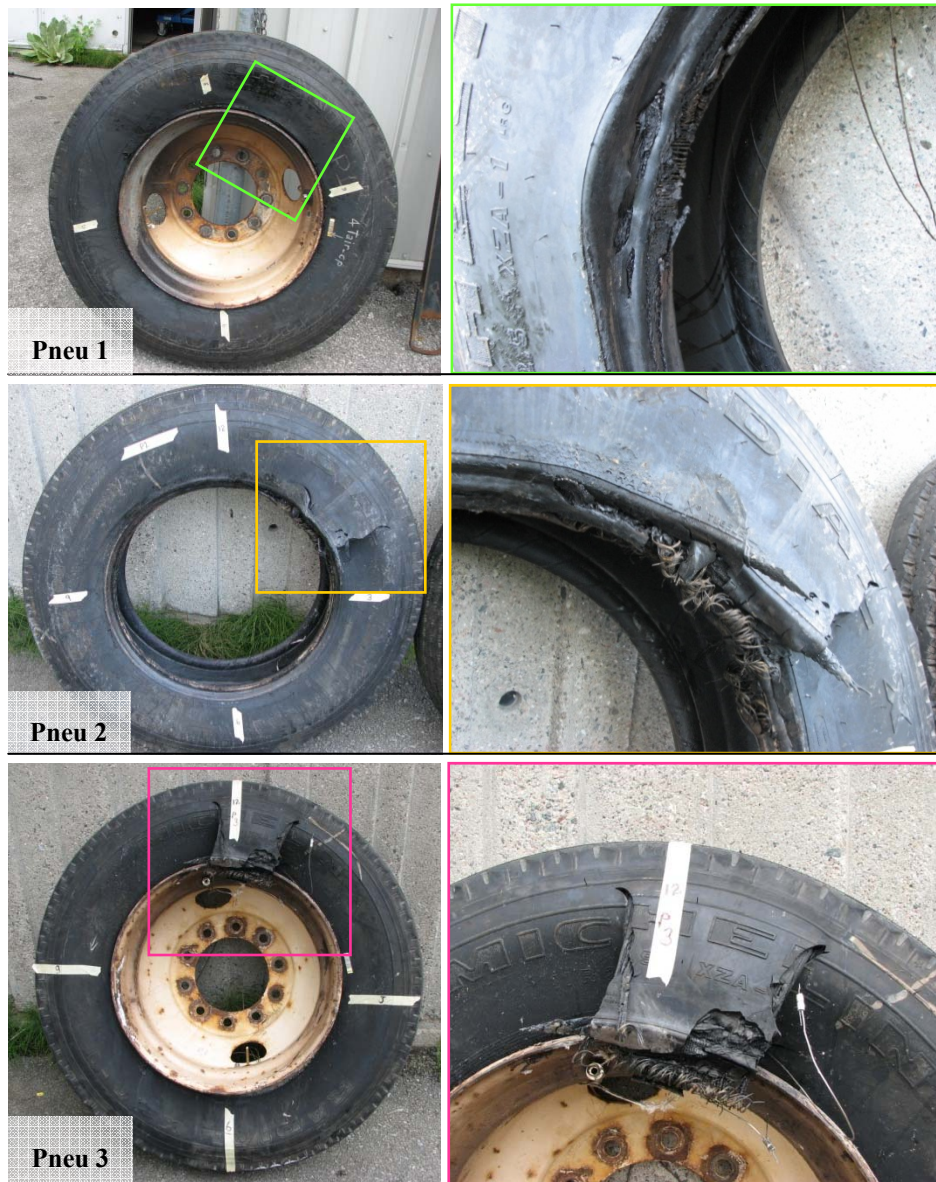


Figure 4-26 Ruptures des pneus après les essais d'explosion

Le premier pneu a subi une modification de sa structure dans la zone du talon mais sans rupture nette de la tringle. Les câbles de la carcasse sont par exemple visibles. La rupture du deuxième pneu s'est amorcée au niveau de la tringle du côté opposé au disque de la jante. A cet endroit, le flanc est déchiré suivant une direction radiale, de la jante vers la bande de roulement. La rupture de la tringle est également responsable de l'éclatement du troisième pneu. Dans ce dernier cas, le flanc présente deux déchirures parallèles qui suivent elles aussi une direction radiale.

Malgré des caractéristiques différentes, on remarque que les trois ruptures ont un point commun : elles se situent toutes les trois du côté opposé au disque de la jante.

4.3.2.2 Mesures de température et de pression

Des capteurs de pression et des thermocouples ont permis de mesurer l'évolution de la pression et de la température de l'air à l'intérieur du pneu, mais aussi la température en plusieurs points du pneu, de la jante et du tambour. Les positions exactes de ces différents capteurs figurent sur le schéma du montage donné en annexe 6. Les mesures de température de l'air à l'intérieur de chacun des pneus sont données à la figure 4-27.

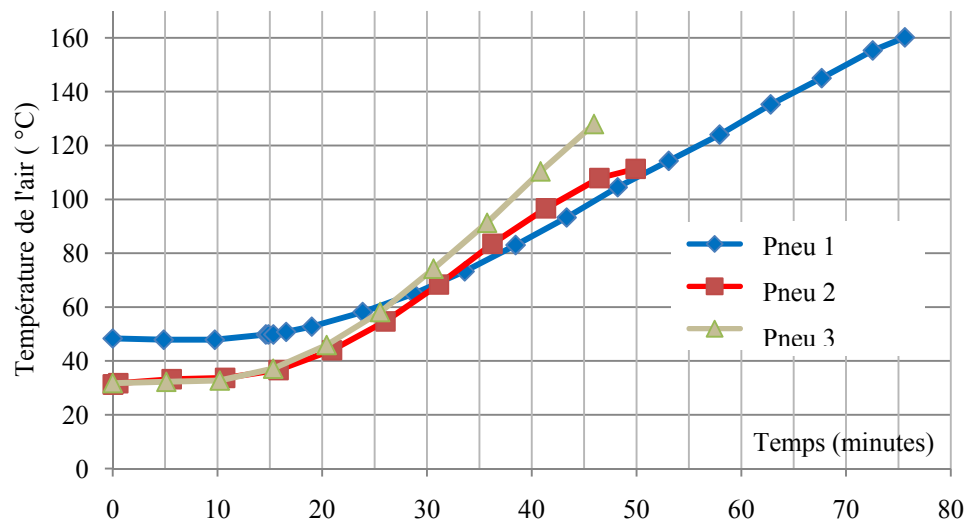


Figure 4-27 Évolution de la température à l'intérieur des 3 pneus

Les trois courbes du graphe précédent présentent la même tendance : une température stable lors des vingt premières minutes (correspondant au temps de latence dû au transfert thermique du tambour au pneu) puis une augmentation linéaire de la température jusqu'à la rupture du pneu. On remarque que les pentes des droites dans la partie linéaire des courbes sont du même ordre de grandeur. Ceci indique que les trois pneus ont été soumis à une vitesse de chauffe similaire. Il semble en plus que le temps à la rupture est d'autant plus faible que la pente de la droite est élevée.

Les mesures de pression enregistrées à l'intérieur des 3 pneus sont données à la figure 4-28.

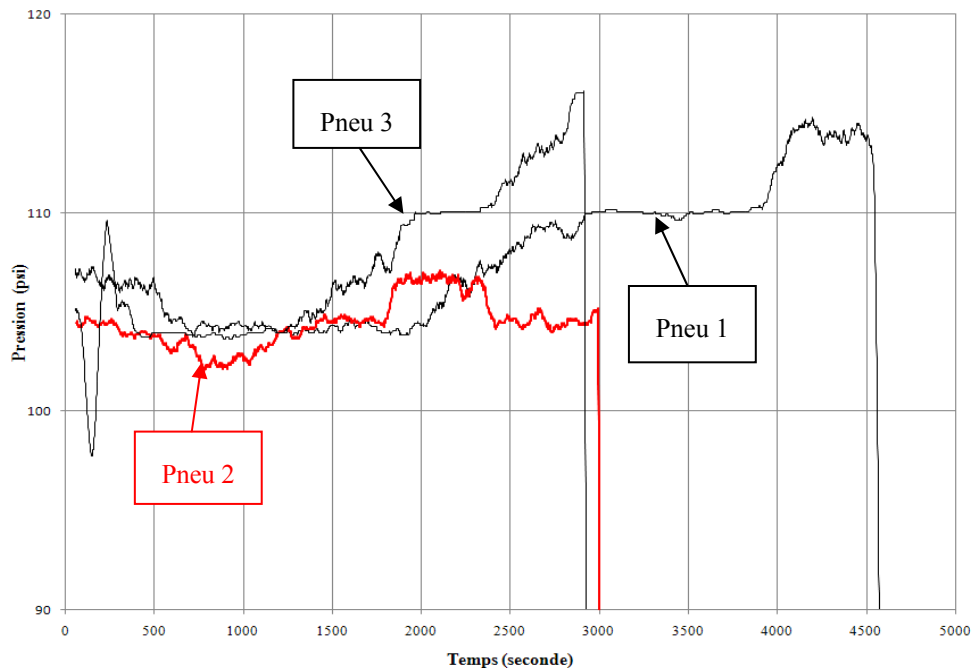


Figure 4-28 Évolution de la pression à l'intérieur de chacun des trois pneus

En analysant le graphe précédent, il semble que les mesures de pression ne soient pas cohérentes. Les évolutions temporelles de pression lors des trois essais sont pour le moins surprenantes puisque la pression augmente et diminue lors de chacun des essais. Mais surtout, les ruptures des pneus ont lieu à des pressions très faibles. La différence entre les pressions initiale et celle mesurée lors de l'éclatement est quasi nulle (pneu 2) ou d'une dizaine de psi seulement.

Reprenons l'équation (2.1) correspondant au phénomène d'expansion thermique de l'air contenu à l'intérieur du pneu. Entre l'état initial (indice 1) et le moment de la rupture (indice 2), nous avons la relation:

$$P_2 = \frac{P_1}{T_1} T_2 \quad (\text{avec } T \text{ en Kelvin}) \quad (4.6)$$

Considérons l'exemple du pneu 2 gonflé initialement à une pression $P_1 = 0,72$ MPa (105 psi) et dont la température au début de l'essai vaut environ $T_1 = 305$ K (32°C). Lors de la rupture, la température à l'intérieur du pneu atteint $T_2 = 383$ K (110°C). Par conséquent, la pression aurait dû atteindre 0,91 MPa (132 psi) par le seul effet de l'expansion thermique. Or, la pression mesurée par les capteurs lors de la rupture (environ 0,72 MPa ou 105 psi) est inférieure à cette valeur théorique. Cet exemple confirme que les mesures de pression ne sont pas cohérentes.

Des raccords soudés à la jante (passage des fils des capteurs ou des tubes pour la pression ou l'échantillonnage des gaz) et une valve de purge permettant l'évacuation des gaz en cas de non explosion semblent être responsables de ces résultats. L'étanchéité de cette valve avec la jante a semble-t-il fait défaut et une fuite d'air a pu s'opérer lors de l'essai.

Aussi, les résultats de pression ne peuvent malheureusement pas être utilisés pour tenir une quelconque conclusion sur les essais. Il aurait été intéressant de vérifier la relation linéaire entre la température et la pression après l'amorce de la réaction chimique. Cette dépendance linéaire avait été observée lors de l'essai d'explosion réalisé par Michelin (cf. paragraphe 2.7.1).

4.3.2.3 Évolution de la concentration des gaz à l'intérieur du pneu

Plusieurs canisters (figure 4-29) intégrés au panneau de contrôle ont permis le prélèvement d'échantillons de gaz contenus à l'intérieur du pneu pour être analysés hors ligne. Par ailleurs, un analyseur FTIR permettant de déterminer en ligne la composition du mélange gazeux prélevé et l'évolution temporelle de la concentration des gaz présents était relié au système de contrôle d'acquisition des gaz. Un exemple des résultats obtenus pour le pneu 1 est donné à la figure 4-30.

L'analyse a mis en évidence la présence des principaux gaz suivants :

- le monoxyde de carbone CO
- le dioxyde de carbone CO₂
- le méthane CH₄
- le monoxyde d'azote NO
- le dioxyde d'azote NO₂
- le dioxyde de soufre SO₂
- le propène (ou propylène) C₃H₆
- le propane C₃H₈
- le propionaldéhyde (ou propanal) CH₃CH₂CHO
- l'hexane C₆H₁₄
- l'acroléine C₃H₄O
- le pentane C₅H₁₂
- le pentène C₅H₁₀



Figure 4-29 Canisters pour l'échantillonnage des gaz

Sur la figure 4-30, on constate que les concentrations en propane, hexane, acroléine et surtout celle en monoxyde de carbone augmentent fortement au bout de 52 minutes, lorsque la température de l'air à l'intérieur du pneu a atteint environ 110°C. On peut donc supposer l'initiation d'une réaction chimique dès cette température. Pour rappel, les résultats de l'expérience menée par Michelin (cf. paragraphe 2.7.1) indiquaient le début d'une réaction chimique dès 97°C à la suite d'un apport de chaleur par soudure sur la jante.

Une analyse plus détaillée doit permettre de déterminer la nature de la réaction thermo-chimique (pyrolyse, thermo-oxydation ou combustion) à l'origine de ces produits.

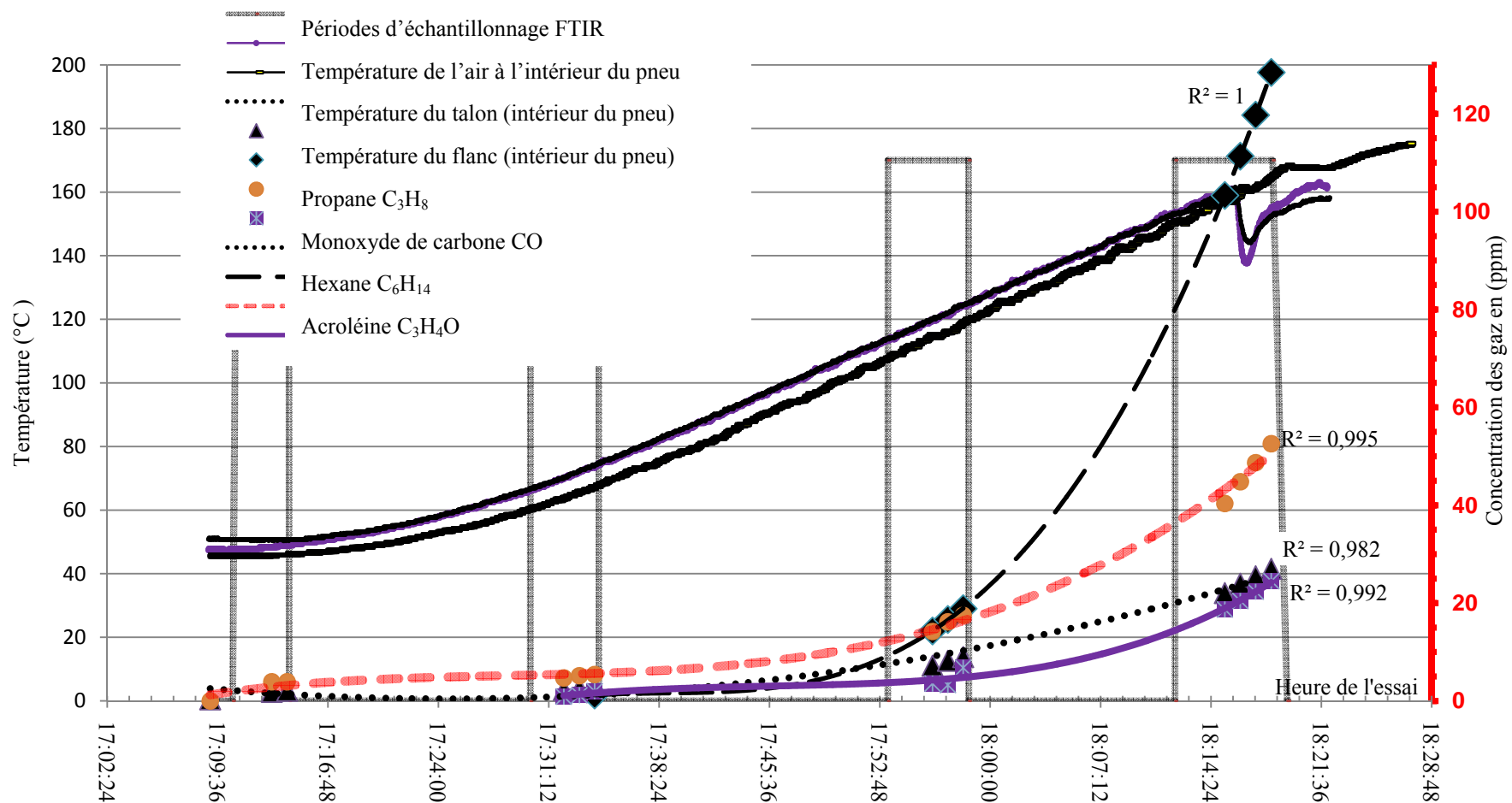


Figure 4-30 Températures de l'air, du talon et du flanc, périodes d'échantillonnage du FTIR et concentration des gaz à l'intérieur du pneu 1

4.3.2.4 Conclusions sur les essais d'explosion réalisés au LCRE

Au vu des difficultés et des résultats énoncés plus haut, la réalisation expérimentale d'une explosion de manière systématique est loin d'être évidente. En effet, avec les problèmes d'installation des capteurs, de soudure ou d'étanchéité des raccords, le montage expérimental n'a pas été en mesure de reproduire une explosion de façon fiable.

Les mesures de pression sont inexploitable et à ce titre, aucune conclusion ne peut être tirée de ces mesures. Cela est d'autant plus regrettable que la pression est à priori un indicateur essentiel pour évaluer le risque d'explosion. Malgré cela, de nouvelles informations ont été obtenues sur la localisation de la rupture et la composition des gaz produits par l'une des réactions chimiques citées dans le deuxième chapitre.

La tendance d'une localisation de la rupture du côté opposée au disque semble se confirmer à la suite des trois essais d'explosion. De plus, les gaz produits par la dégradation de la matrice en caoutchouc ont pu être identifiés. La concentration de plusieurs d'entre eux augmente de manière significative, marquant alors le début d'une réaction chimique, lorsque la température de l'air à l'intérieur du pneu atteint une valeur aussi faible qu'une centaine de degrés Celsius. Il reste à déterminer la ou les réactions chimiques à l'origine de ces produits.

Si les essais expérimentaux réalisés au LCRE n'ont pas apporté toutes les réponses souhaitées, ils n'ont pas été inutiles. Les difficultés techniques éprouvées lors de ces essais peuvent être corrigées et la connaissance de ces difficultés est capitale en vue de la réalisation des essais sur piste.

4.4 Conclusion sur le phénomène d'explosion de pneu

Les nouvelles observations, qu'elles soient numériques ou expérimentales, donnent assez d'informations pour être en mesure de décrire le phénomène d'explosion de pneu.

Avec les informations retrouvées dans la littérature, elles permettent notamment de compléter la séquence des événements présentée au paragraphe 2.5 sur le processus général menant à l'explosion d'un pneu.

Voici alors le scénario probable menant à l'explosion d'un pneu :

Étape 1 :

Une source de chaleur qu'elle soit externe ou interne provoque une augmentation de la température du pneu et de l'air contenu à l'intérieur de celui-ci.

La pression à l'intérieur du pneu augmente avec l'expansion thermique.

Étape 2 :

Lorsque le caoutchouc du pneu est chauffé à une certaine température (celle-ci peut correspondre à une température de l'air dans le pneu aussi basse que 100 °C), des réactions de dégradation chimique du caoutchouc sont initiées. On peut mentionner la thermo-oxydation, où la présence d'oxygène vient abaisser la température à partir de laquelle la dégradation thermique commence [30].

Ces différentes réactions chimiques produisent des gaz et des matières inflammables qui contribuent à augmenter la pression.

Étape 3 :

La température augmente (par l'apport de chaleur et/ou les réactions chimiques), et l'accumulation de gaz et de matières inflammables due à la dégradation du caoutchouc se poursuit.

Étape 4 :

Une explosion s'initie lorsque les trois conditions suivantes sont satisfaites :

- une concentration particulière des gaz (1- 8 % du volume) [21]

Cette concentration doit être comprise entre la limite inférieure d'explosivité (LIE) et la limite supérieure d'explosivité (LSE) du mélange gazeux [44].

- une température supérieure à la température d'auto-allumage des gaz
- une présence d'oxygène (concentration supérieure à 5,5 %)

Étape 5 :

L'onde de pression résultant du mélange explosif se déplace circonférentiellement dans deux directions à partir du point d'initiation. Les deux fronts d'onde se rencontrent au point diamétralement opposé à ce point

Étape 6 :

La rencontre des deux fronts d'onde provoque la rupture du pneumatique au niveau des deux flancs situés à 180° par rapport au point d'initiation.

Étape 7 :

La rupture des flancs provoque un déplacement d'air à très grande vitesse à l'extérieur du pneu et s'accompagne de la projection de fragments. Les vitesses atteintes par l'air et les débris sont suffisantes pour provoquer des blessures sévères (voire même la mort) à toute personne se trouvant à proximité du pneu ou des dommages aux structures avec des conséquences très importantes.

Il est à noter que l'énergie libérée est telle que les forces de réaction sur la roue peuvent projeter celle-ci à une grande distance si elle n'est pas suffisamment arrimée ou fixée à une structure très lourde. C'est d'ailleurs le débris le plus mortel s'il frappe le travailleur au passage...

CHAPITRE 5 ÉCLATEMENT D'UN PNEUMATIQUE PAR SURPRESSION

Comme énoncé dans le premier chapitre, on distingue principalement quatre types d'éclatements de pneu d'origine mécanique. Ceux-ci peuvent résulter d'une surpression lors du gonflage du pneu, du phénomène de dézippage (ou « *zipper failure* »), d'un déjantage ou encore d'un pneu en mauvais état ou avec une faiblesse structurale. Dans tous les cas, il s'en suit un relâchement soudain de pression.

Dans ce chapitre, on s'intéresse plus particulièrement à l'éclatement par surpression qui a été à l'origine de plusieurs accidents par le passé.

Puisque peu d'études scientifiques sont entièrement consacrées à ce phénomène (les études réalisées par les fabricants de pneus restent dans le domaine privé), ce chapitre vise à fournir des données scientifiques nécessaires à la compréhension et à la description du phénomène d'éclatement par surpression. Afin de déterminer les limites de rupture en pression d'un pneu et le scénario conduisant à l'éclatement d'un pneu par surpression, un essai hydrostatique d'éclatement ainsi qu'une inspection aux rayons X du pneu éclaté ont été réalisés. De plus, un modèle numérique de pneu utilisant la méthode des éléments finis a été développé dans le but de calculer numériquement la pression d'éclatement et observer les différents comportements des éléments constitutifs.

Ce chapitre a fait l'objet d'un article soumis à la publication dans la revue « Tire science and technology ».

5.1 Le phénomène d'éclatement par surpression

L'éclatement par surpression survient généralement lors du gonflage du pneu c'est-à-dire lorsque le pneu est gonflé au-delà des pressions recommandées par le fabricant. Dans ce cas, un violent éclatement en résulte. L'absence de dispositif de retenue (cage de sécurité par exemple), une pression du compresseur mal ajustée, un problème de manomètre ou de valve ou encore une surpression volontaire du montage pour forcer le pneu à se coller à la jante sont particulièrement mis en cause dans ce type d'accidents. Il arrive que le montage d'un pneu sur la jante soit particulièrement difficile (manque de lubrifiant, mauvaise technique de montage, etc....). Dans ce

cas, il n'est pas rare que l'on tente de gonfler le pneu à une pression supérieure à la pression maximale recommandée par le fabricant de la jante ou du pneu pour cette opération.

5.1.1 Pressions d'éclatement

Plusieurs études ont été consacrées à l'éclatement par surpression. Deux d'entre elles [82, 83] ont permis d'établir les pressions d'éclatement lors d'un sur gonflage dans le cas de pneus neufs et usagés.

Selon [83], les pressions d'éclatement obtenues avec des pneus usagés sont supérieures à celles observées avec des pneus neufs similaires. Dans cette étude, 3 pneus neufs et 13 pneus usagés de camion de dimensions 295/75R22.5 et 275/80R22.5 ont été soumis à une pression hydrostatique jusqu'à leur éclatement.

Les résultats suivants permettent de comparer les résistances des pneus neufs et usagés :

Tableau 5-1 Comparaison des pressions moyennes d'éclatement de pneus neufs et usagés

Échantillons	Pression moyenne d'éclatement (MPa)	Écart-type (MPa)	Mode de rupture	
			Rupture des tringles	Déformation des tringles
13 pneus radiaux usagés de camion	3,14 (456 psi)	0,50 (72 psi)	7	6
3 pneus radiaux neufs de camion	2,76 (400 psi)	0,79 (115 psi)	3	-

Toujours selon [83], la différence entre les deux types de pneus résulte de l'uniformisation par redistribution de la charge. Plus exactement, la charge imposée à chaque fibre des éléments de renfort tend à s'uniformiser après que le pneu a roulé durant une certaine période. Dans le cas des pneus neufs, certaines parties des fibres peuvent subir des charges importantes alors que d'autres parties ne subissent que de faibles charges. Au fil du temps, le pneu devient plus « mature » et les

différents composants s'agencent ensemble de sorte que la résistance du pneu s'en voit augmentée.

Des mesures de pressions d'éclatement sensiblement différentes ont été retrouvées dans la littérature avec des pneus neufs de dimensions 11R24.5 montés sur des jantes neuves. Campbell et al. [82] ont enregistré des pressions d'éclatement comprises entre 2,17 MPa (315 psi) et 2,21 MPa (320 psi).

Les résultats de l'étude [82] sont synthétisés dans le tableau 5-2 :

Tableau 5-2 Pressions d'éclatement

Référence de l'essai	Pression maximale (MPa) à $\pm 0,03$ MPa (5 psi)	Pression maximale moyenne (MPa)
B1/1-2	2,17 (315 psi)	2,18 (316,7 psi)
B4/1-8	2,17 (315 psi)	
B5/1-9	2,21 (320 psi)	

5.1.2 Modes de rupture

Selon Tom Baker de *Smithers Scientific Services*, les flancs ne sont pas susceptibles de rompre à la suite d'un sur gonflage. Ils rompent seulement à cause d'une accumulation de chaleur par friction ou d'une fatigue des matériaux. Lorsqu'un pneu est gonflé jusqu'à la limite de sa résistance, la rupture se produit majoritairement dans les tringles.

Les résultats numériques de Tseng et al. [61] confirment cette hypothèse. Lors du gonflage le talon du pneu se lève mais maintient un contact étanche avec le bord de la jante. Le déplacement de l'ensemble produit une tension circonférentielle très élevée dans le fil de la tringle. La rotation de la tringle provoque alors une grande tension dans le coin inférieur de celle-ci (figure 5-1).

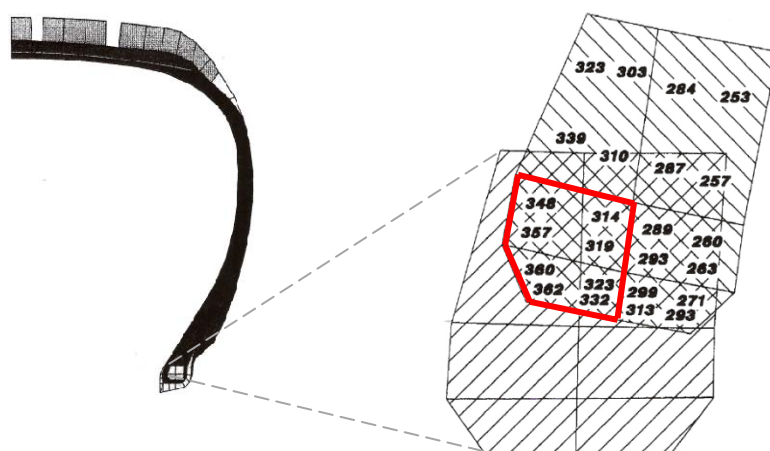


Figure 5-1 Distribution des charges (en lbs) dans la tringle à 300 psi
(charge maximale = 310 lbs)

La rupture du fil situé dans la partie inférieure et intérieure de la tringle déclenche une réaction en chaîne provoquant les défaillances des fils de la tringle en raison d'une redistribution des contraintes. Le tout mène à l'éclatement du pneu.

5.2 Essai hydrostatique d'éclatement par surpression

Dans le but de déterminer la résistance d'un pneu lorsque celui-ci est gonflé bien au-delà de la pression maximale recommandée par le fabricant, un test hydrostatique d'éclatement a été effectué sur un pneu neuf de camion de taille 11R22.5. La pressurisation avec l'eau est homogène et précise et il s'agit de la méthode la plus sûre pour déterminer l'intégrité de n'importe quel type de conteneur [83]. Du fait de l'incompressibilité de l'eau, l'énergie emmagasinée à l'intérieur du pneu est en effet très inférieure à celle qu'on pourrait obtenir avec un gonflage à l'air.

5.2.1 Description de l'essai expérimental

Le schéma du montage expérimental utilisé pour le test hydrostatique est illustré à la figure 5-2.

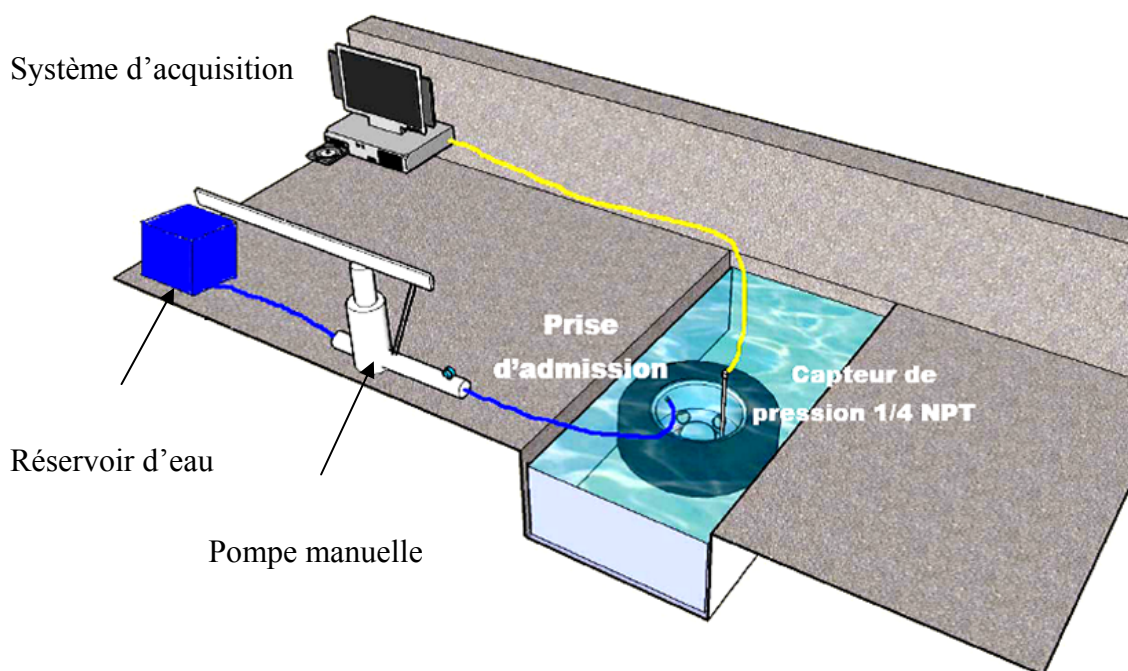


Figure 5-2 Schéma du montage expérimental utilisé lors du test hydrostatique

Le pneu, monté sur une jante neuve en aluminium et gonflé initialement à l'air à une pression de 100 psi, est immergé dans l'eau afin de limiter les éclaboussures et contenir d'éventuelles projections de fragments lors de l'éclatement. La jante est, elle, instrumentée avec un capteur de pression 0 - 6,89 MPa (0 - 1000 psi) et un tuyau de remplissage. Le pneu est mis en pression avec l'eau à l'aide d'une pompe manuelle tandis que l'air contenu initialement dans le pneu est évacué via la valve installée avec le capteur de pression. Du permanganate de potassium est introduit comme colorant à l'intérieur du pneu afin de repérer la fuite de l'eau contenue à l'intérieur du pneu. Enfin, l'acquisition des données est réalisée avec le logiciel Labview à partir des mesures de pression du capteur.

5.2.2 Mesure de la pression d'éclatement

Le graphique de montée en pression en fonction du temps est donné à la figure 5-3.

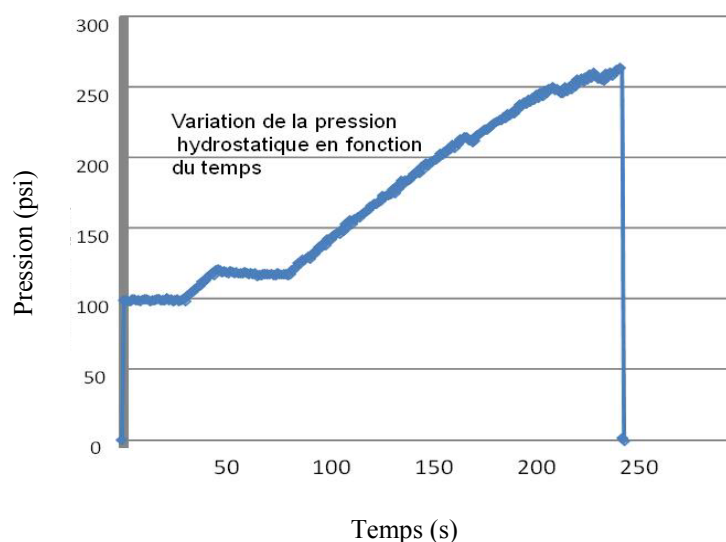


Figure 5-3 Montée en pression du pneu lors du test hydrostatique

La nette chute de pression observée à la 243^{ème} seconde de l'essai marque l'éclatement du pneu. La pression d'éclatement mesurée est de 1,826 MPa (264,85 psi) ce qui correspond à une pression 2,5 fois supérieure à la pression nominale recommandée par le fabricant du pneu.

À titre de comparaison, les auteurs de l'étude [83] ont obtenu une pression moyenne d'éclatement de 2,76 MPa (400 psi) sur des pneus neufs de même taille mais avec un écart type important de 0,79 MPa (115 psi). Selon cette étude, le pneu que nous avons testé se situe à un peu plus d'un écart type sous la moyenne.

5.2.3 Rupture du pneumatique

5.2.3.1 Mode de rupture

La rupture du pneumatique s'est amorcée au niveau de la tringle du côté opposé au disque de la jante (figure 5-4). La direction de rupture suit une direction radiale, de la jante vers la bande de roulement. Sous la pression imposée, tous les brins d'acier de cette tringle ont cédé. Ils ont été soumis à une force de tension très importante puisque le faciès de rupture indique une rupture de type ductile. En effet, une zone de striction des fils est observable à l'endroit de la rupture.

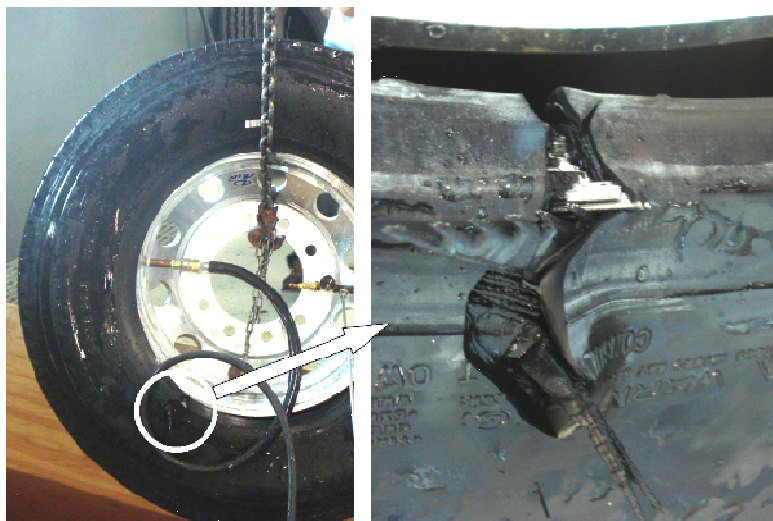


Figure 5-4 Rupture du pneumatique lors du test hydrostatique

Un échantillon des brins cassés de la tringle a été observé avec un microscope à balayage électronique (MEB) de type JEOL JSM-840A équipé d'un spectromètre rayons X à sélection d'énergie. La figure 5-5 et la figure 5-6 illustrent des micrographies de la surface de rupture d'un brin de la tringle ayant rompu lors du test hydrostatique. On note clairement la présence des cupules³ typiques de rupture ductile (figure 5-6). L'analyse a également permis de mesurer une striction à la rupture d'environ 40% ce qui confirme l'occurrence d'une déformation plastique des tringles (figure 5-5).

³ Cavités s'allongeant dans le sens de la déformation puis se réunissant par striction ou cisaillement pour produire la rupture.

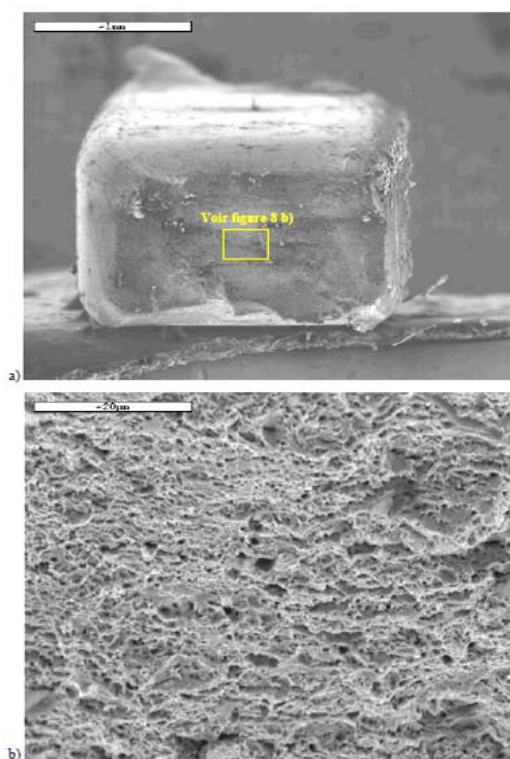


Figure 5-6 Micrographies réalisées à différents grossissements au MEB du faciès de rupture d'un brin de la tringle ayant subi la rupture lors de l'essai hydrostatique

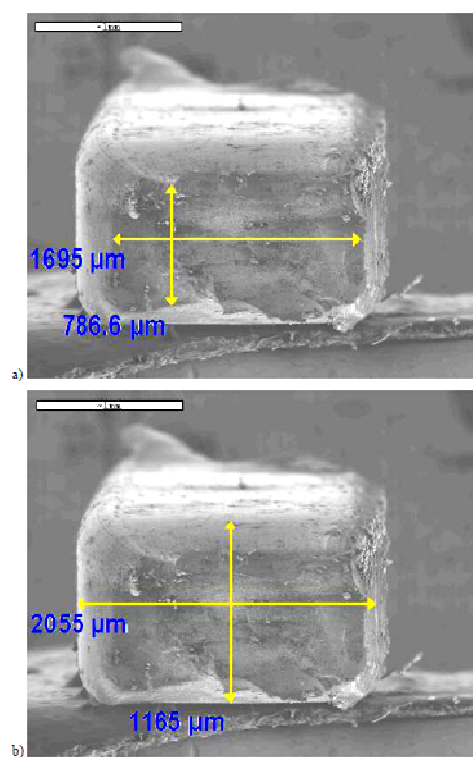


Figure 5-5 Micrographies réalisées au MEB du faciès de rupture d'un brin de la tringle ayant subi la rupture lors de l'essai hydrostatique qui permettent d'observer la diminution de section

5.2.3.2 Inspection de la rupture aux rayons X

Pour obtenir plus de détails quant à la rupture des fils constituant la tringle, une inspection aux rayons X a été effectuée. Cette opération est courante chez les manufacturiers où « certains pneus sont extraits de la chaîne de production et examinés aux rayons X pour en détecter les faiblesses cachées ou les défauts internes » [84]. La figure 5-7 illustre le montage utilisé pour obtenir une vue des enroulements et de la structure de la tringle. Le pneu a été placé avec un certain angle pour permettre aux rayons de la source de traverser la tringle parallèlement aux rangées des enroulements de la tringle.

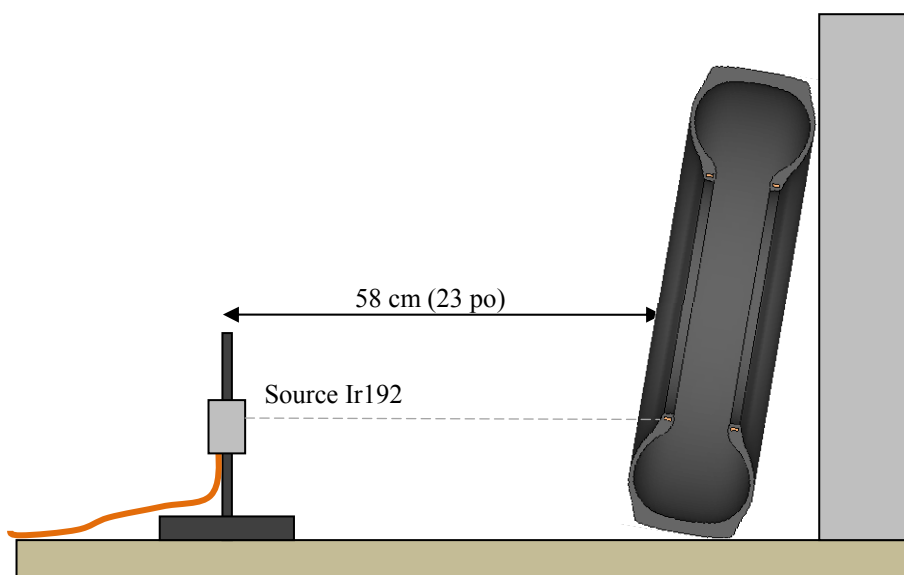


Figure 5-7 Montage utilisé pour l'inspection du pneu aux rayons X

Sur les radiographies, l'enroulement des fils et l'orientation des différentes nappes sont clairement visibles. Comme l'illustre la figure 5-8, les tringles consistent en réalité en un enroulement de câbles rectangulaires qui se chevauchent en deux points sur la circonférence du pneu.

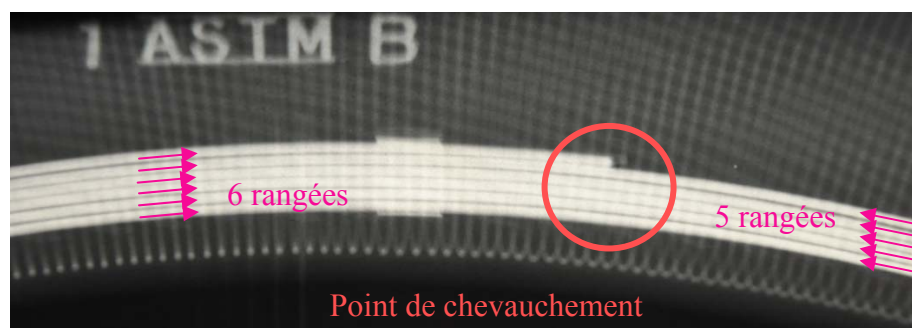


Figure 5-8 Radiographie de la tringle

Il s'agit là d'une conception classique des tringles. D'autres conceptions ne présentant pas de chevauchement existent également. À ces deux points de chevauchement, on note un changement de hauteur totale de la tringle (5 rangées de brins d'un côté et 6 rangées de brins de l'autre côté du point de chevauchement pour le pneu concerné) qui correspond à un changement de section (figure 5-9).

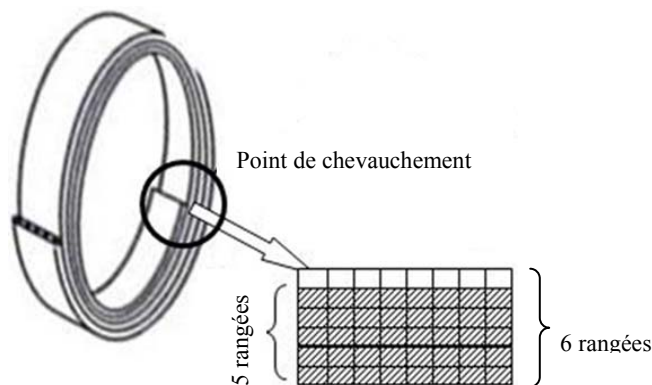


Figure 5-9 Changement de section de la tringle au point de rupture

On remarque justement sur la radiographie de la figure 5-10 que la rupture est localisée à l'un des points de chevauchement. Le changement de section, qui constitue une discontinuité, induit un changement local de rigidité de la tringle et favorise ainsi une concentration des contraintes à cet endroit. Soumise à une sollicitation, la tringle est donc susceptible de subir en premier lieu une défaillance au niveau d'un des deux points de chevauchement.

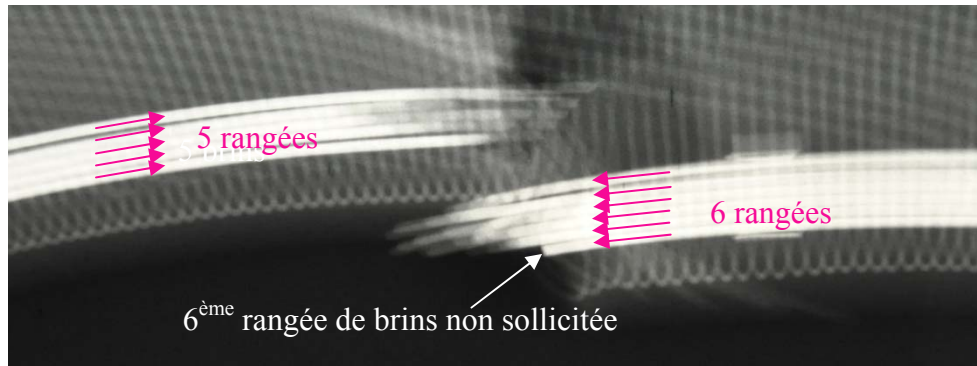


Figure 5-10 Zone de rupture observée aux rayons X

5.3 Simulation d'un éclatement par surpression par la méthode des éléments finis

5.3.1 Résultats de simulations retrouvés dans la littérature

La méthode des éléments finis a été avantageusement utilisée pour la conception de nouveaux pneus et l'amélioration de ceux déjà existants. Elle représente en effet un outil numérique

intéressant pour évaluer la résistance ultime d'un pneumatique. Plusieurs études [51, 61, 65] ont été consacrées à l'étude de la résistance d'un pneu en cas de sur gonflage.

Les résultats de Tseng et al. [61] indiquent que les fils des tringles sont les premiers éléments à atteindre leur résistance ultime. Bolarinwa et al. [51] se sont basés sur les déformations maximales des renforts pour prédire l'éclatement du pneu. Dans cette étude, la pression d'éclatement est supposée être la plus basse pression à laquelle la déformation à la rupture de n'importe quel renfort est atteinte. Les résultats énoncés dans cette étude peuvent toutefois être remis en cause puisque les tringles n'ont pas été modélisées géométriquement et donc pas prises en compte comme moyen de renfort. Bolarinwa et al. [51] ont ainsi déterminé une pression d'éclatement de 0,7 MPa (101,5 psi) pour un pneu de voiture de tourisme 195/65 R15 alors que des essais sur des pneus similaires ont permis de mesurer une pression d'éclatement de 1 MPa (145 psi). Si la pression d'éclatement calculée numériquement se veut conservatrice, un écart relativement important (de 30% par rapport à la valeur expérimentale) peut être noté.

5.3.2 Simulation d'un éclatement par surpression par la méthode des éléments finis

La simulation d'éclatement par surpression consiste à appliquer au pneu une pression de gonflage de manière progressive.

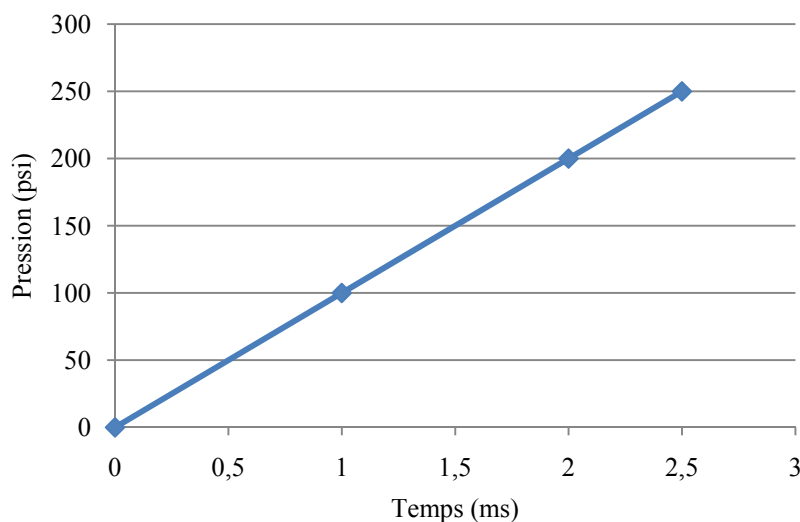


Figure 5-11 Pression imposée au pneu

Au vu de la rupture observée lors du test hydrostatique, la pression d'éclatement est ici définie comme la pression à laquelle la déformation plastique maximale des tringles ($\varepsilon_{p \max} = 1,6\%$) est atteinte. La rupture des tringles signifie donc la rupture du pneu.

5.3.3 Résultats de la simulation par la méthode des éléments finis

5.3.3.1 Pression d'éclatement

La figure 5-12 et la figure 5-13 présentent respectivement l'évolution de la contrainte maximale de Von Mises et la déformation plastique dans les tringles en fonction de la pression. On remarque qu'au-delà de 110 psi, la contrainte maximale de Von Mises augmente de façon exponentielle jusqu'à atteindre la limite élastique du matériau à environ 181 psi. Au-delà, les fils d'acier constituant les tringles subissent des déformations plastiques jusqu'à la rupture des brins. Sous la condition énoncée précédemment ($\varepsilon_{p \max} = 1,6\%$), la pression d'éclatement est 1,888 MPa (273,83 psi). Cette valeur est très proche de la pression d'éclatement observée lors des essais expérimentaux (1,826 MPa ou 264,85 psi).

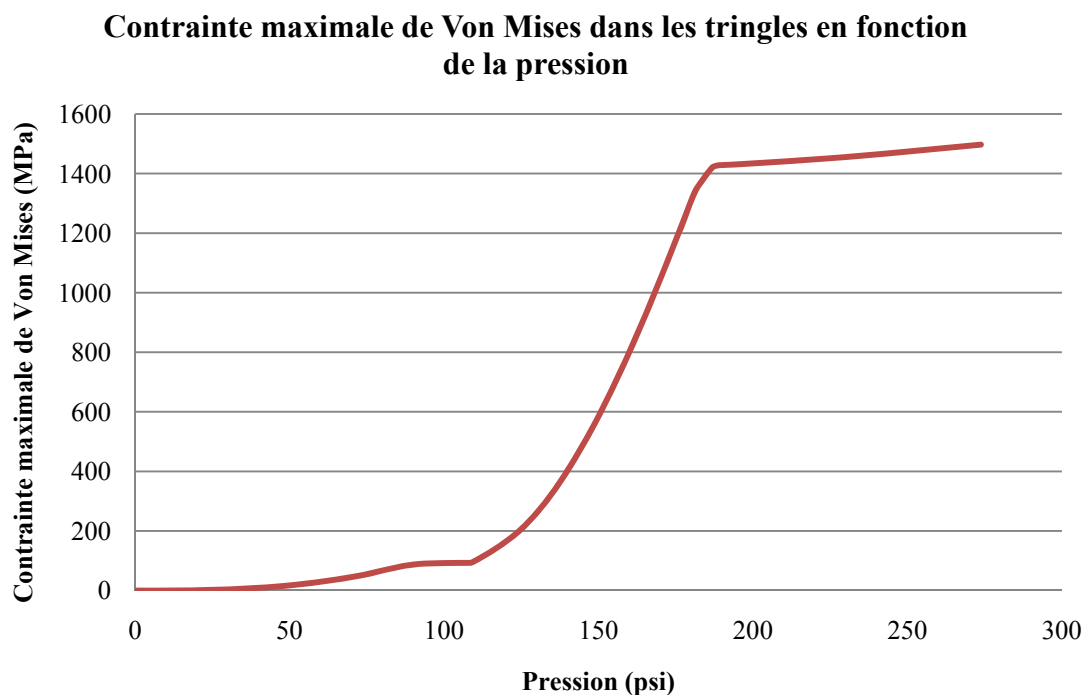


Figure 5-12 Contrainte maximale de Von Mises dans les tringles en fonction de la pression

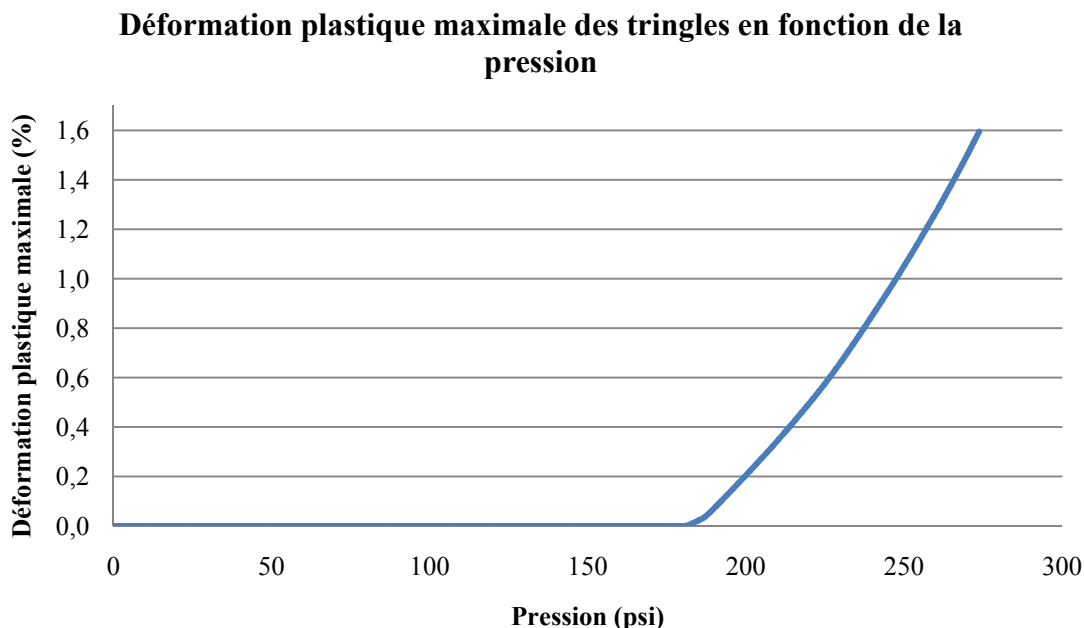


Figure 5-13 Déformation plastique maximale dans les tringles en fonction de la pression

Une nuance doit toutefois être faite puisqu’une certaine variabilité de la pression d’éclatement aurait été observée en effectuant plusieurs essais. Si un essai d’éclatement sur un seul échantillon ne peut être représentatif du phénomène, il permet tout de même de préciser l’ordre de grandeur de la pression d’éclatement.

Il est à noter que la tringle est l’élément de renfort à atteindre en premier sa déformation à la rupture. Lors de la rupture de la tringle, les autres renforts subissent des déformations inférieures ou égales à 8,2 % alors que les déformations à la rupture du nylon, du polyester et de l’acier sont respectivement de 21, 16 et 10% [51].

5.3.3.2 Distribution des contraintes et des déformations plastiques dans les tringles et localisation de la rupture

Les résultats de la simulation numérique indiquent que la déformation plastique maximale est atteinte dans la tringle se situant du côté opposé au disque de la jante (figure 5-14).

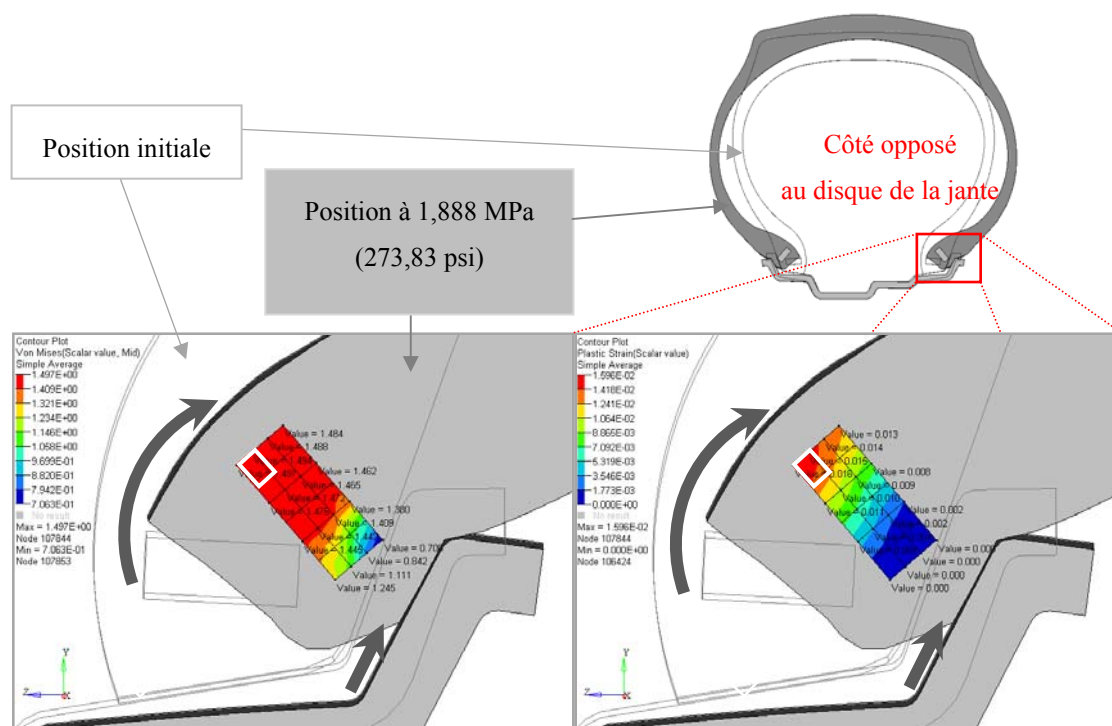


Figure 5-14 Distribution des contraintes (en GPa) et des déformations plastiques dans la tringle à 1,888 MPa (273,83 psi) et déplacement de celle-ci au cours du gonflage

D'autre part, comme l'indiquent également les résultats de Tseng et al. [61], les contraintes et les déformations plastiques maximales se situent dans le coin inférieur de la tringle et du côté opposé à la jante. Les fils d'acier se trouvant dans le coin diagonalement opposé ne subissent, eux, aucune déformation plastique; la contrainte étant inférieure à la limite élastique.

On note aussi une déformation importante de la jante puisque la largeur de celle-ci varie de 8,80 mm au cours de l'essai. À titre de comparaison, Campbell et al. [82] avaient mesuré une variation de la largeur jusqu'à 5,66 mm pour des jantes de 24,5 pouces.

5.3.3.3 Interprétation du phénomène

Le scénario mis en évidence par Tseng et al. [61] semble être vérifié. Soumis à une pression de gonflage, le talon du pneu se lève. Le pneu glisse le long de la jante tandis que les flancs se déforment vers l'extérieur. Ce déplacement global du pneu provoque une rotation des tringles (figure 5-14), de telle sorte que le rayon des brins d'acier entourant le pneu augmente. Il en

résulte une déformation des brins et l'apparition d'une tension circonférentielle très élevée dans les brins se trouvant dans le coin inférieur des tringles et opposé au bord de la jante. De plus, la tension maximale apparaît dans la tringle se trouvant du côté opposé au disque où la jante y est moins rigide. Dans cette zone, la jante subit donc une plus grande déformation sous l'action de la pression intérieure, tout en réduisant le support fourni à la tringle. La rupture du brin situé dans le coin inférieur de ladite tringle (identifié par un carré blanc sur la figure 5-14) déclenche une redistribution des contraintes. La tension alors supportée par les autres fils ne peut être maintenue ce qui entraîne une défaillance en cascade, en affectant finalement l'ensemble de la tringle.

Les tringles n'assurant plus le maintien du pneu sur la jante, un éclatement correspondant à une brusque libération de pression se produit.

5.3.3.4 Considérations sur le modèle numérique

Après les différentes simulations effectuées, plusieurs considérations quant au modèle numérique peuvent être faites afin de modéliser convenablement l'éclatement par surpression.

Il est apparu essentiel d'inclure la jante dans le modèle plutôt que d'imposer des conditions limites au pneu. La jante joue en effet un rôle important dans le scénario d'un tel événement. N'étant pas symétrique par rapport au plan longitudinal, elle présente des différences de rigidité entre le côté du disque et le côté opposé à celui-ci. Ceci explique la tendance d'une localisation de la rupture de la tringle du côté opposé au disque, faits conformés par l'essai expérimental et par la simulation.

La déformation plastique maximale des tringles comme condition de rupture semble être justifiée puisqu'il s'agit du moyen de renfort à atteindre en premier sa déformation à la rupture.

Le modèle présenté ici peut encore être amélioré. Il est vrai que celui-ci ne prend pas en compte les fils d'acier des tringles de manière individuelle puisque les tringles sont modélisées sous la forme d'un seul bloc d'acier. Cette modélisation introduit une torsion de la tringle qui sera en réalité négligeable aux niveaux des fils constituants. Ceux-ci sont soumis essentiellement à une contrainte de traction, soit la contrainte circonférentielle manifestée dans le pneu par l'augmentation de diamètre induite par la surpression.

Il serait donc intéressant de modéliser les fils séparément et d'inclure au modèle une interface entre ces différents fils afin de saisir la redistribution des contraintes.

De même, il apparaît primordial de modéliser le chevauchement pour y inclure le changement de section des tringles.

5.4 Conclusion sur le phénomène d'éclatement par surpression

À la lumière des informations récoltées dans la littérature, des simulations numériques et des essais expérimentaux réalisés, plusieurs caractéristiques du phénomène d'éclatement par surpression peuvent être énoncées :

- L'éclatement d'un pneu par surpression résulte d'une augmentation de la pression bien au-delà des pressions nominales recommandées (facteur de sécurité d'environ 2,5 pour un pneu de taille 11R22.5).
- Les pressions d'éclatement obtenues avec des pneus usagés sont supérieures à celles observées avec des pneus neufs similaires.
- La rupture se produit majoritairement dans les tringles.
- Elle se manifeste plus exactement à un point de chevauchement des fils de la tringle elle-même située à l'opposé du disque de la jante.
- L'amorce de rupture de la tringle se situe au niveau du fil d'acier localisé dans la partie inférieure de la tringle.
- L'énergie libérée lors de l'éclatement est très élevée et elle est susceptible de tuer une personne se trouvant à proximité du pneu ou apporter de dommages aux conséquences désastreuses.
- Le risque d'éclatement par surpression peut être limité par l'utilisation systématique de règles de sécurité (système de retenu lors du gonflage, valve de sécurité du compresseur et distance minimale sécuritaire).

L'IRSST, en collaboration avec l'Association Sectorielle Transport Entreposage (ASTE), a élaboré une fiche technique [85] destinée au personnel affecté à la réparation et à l'entretien de véhicules lourds. Les précautions à adopter lors du gonflage d'un pneu y sont répertoriées.

CONCLUSION

Les travaux de recherche du présent projet visaient à mettre à jour les connaissances sur les événements d'éclatement et d'explosion de pneus de poids lourds, mais aussi investiguer sur leurs causes et leurs conséquences.

Pour cela, des essais expérimentaux d'explosion ont été menés au Laboratoire Canadien de Recherche sur les Explosifs (LCRE) à Ottawa, Canada, puis un test d'éclatement hydrostatique, une inspection aux rayons X et des analyses microscopiques ont été effectués. En complément de ces essais, une analyse numérique utilisant la méthode des éléments finis a été menée à l'aide du logiciel Altair Radioss. L'ensemble de ces outils ont permis de fournir de nouvelles informations sur l'explosion et l'éclatement de pneu par surpression.

Les éclatements et explosions de pneus, bien que relativement rares, sont très dangereux du fait de leur imprévisibilité. Ils interviennent la plupart du temps lors de la réparation, de l'entretien ou encore du remplacement des roues du véhicule.

La cause la plus commune des phénomènes d'éclatement ou d'explosion de pneu est un apport de chaleur au système pneu-jante. Cet apport de chaleur déclenche des réactions chimiques qui dégradent le caoutchouc des pneus produisant alors des gaz et des matières inflammables. Les réactions de pyrolyse, de thermo-oxydation et de combustion sont particulièrement mises en cause. En s'ajoutant au phénomène d'expansion thermique et la diminution des propriétés mécaniques par divers facteurs, les gaz produits contribuent à l'augmentation de la pression dans le pneu et favorisent ainsi le risque d'éclatement ou d'explosion. L'explosion du pneu survient lorsque les trois conditions critiques de concentration et de température des matières inflammables et de concentration en oxygène sont simultanément réunies.

L'onde de pression résultant du mélange explosif se déplace circonférentiellement dans deux directions à partir du point d'initiation. Les deux fronts d'onde se rencontrent au point diamétralement opposé à ce point et la rencontre des deux fronts d'onde provoque la rupture du pneumatique au niveau des deux flancs. La rupture des flancs provoque alors un important

déplacement d'air à très grande vitesse à l'extérieur du pneu et s'accompagne de la projection de fragments.

L'éclatement de pneu par surpression, quant à lui, survient lorsque le pneu est gonflé bien au-delà de la pression nominale recommandée. Le facteur de sécurité a été évalué à 2,5 pour un pneu neuf de taille 11R22.5.

Un essai hydrostatique d'éclatement ainsi qu'une inspection aux rayons X du pneu éclaté ont permis de déterminer les limites de rupture en pression d'un pneu et le scénario conduisant à son éclatement. La pression d'éclatement a été calculée numériquement à l'aide d'un modèle numérique de pneu utilisant la méthode des éléments finis. En définissant dans ce modèle la pression d'éclatement comme la pression à laquelle la déformation plastique maximale des tringles est atteinte, il a été possible de déterminer une pression d'éclatement très proche de celle observée expérimentalement pour le même type de pneu. Les essais expérimentaux et l'analyse numérique ont ainsi permis de comprendre pourquoi, où, quand et comment un pneu éclate lorsqu'il est sur gonflé.

En pratique, la pression exercée entraîne la plupart du temps une rupture au niveau de la tringle située du côté opposé au disque de la jante. La rupture se manifeste plus exactement à un point de chevauchement de ladite tringle. L'éclatement résulte alors de la rupture du fil d'acier situé dans la partie inférieure de la tringle et opposé au bord de la jante. L'énergie libérée lors de l'éclatement est, comme dans le cas de l'explosion, très importante et dangereuse.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ne permettent pas pour autant de répondre à toutes les questions. Les valeurs critiques des indicateurs permettant d'anticiper l'un ou l'autre des phénomènes (la température et la pression en particulier) ne sont pas encore connues précisément. Il en est de même pour le temps de réaction. Il est donc nécessaire d'approfondir ces questions afin de fournir aux personnes concernées tous les moyens nécessaires pour leur permettre de diagnostiquer correctement le danger afin de se protéger et d'intervenir en sécurité [7]. Dans cette optique, la poursuite des recherches s'avère nécessaire tant d'un point de vue expérimental que numérique.

Un essai sur piste avec un camion muni d'une semi-remorque instrumentée est ainsi prévu pour l'année 2011. Il consistera à apporter une source de chaleur au système pneu-jante, par

l'intermédiaire d'un frein partiellement bloqué par exemple, jusqu'à l'éclatement ou l'explosion du pneu.

En complément de cet essai, des développements devront être réalisés pour compléter l'analyse numérique. Dans le cas de l'éclatement par surpression, le modèle devrait être amélioré. Puisque les tringles sont responsables de la rupture du pneu, il serait judicieux de modéliser les différents brins d'acier composant les tringles de manière individuelle et de considérer un contact entre chacun d'eux. La modélisation des tringles sous la forme d'un bloc homogène est toutefois suffisante pour mener les simulations d'explosion. Dans ce cas, ce sont plutôt les conditions de rupture adéquates qu'il reste à déterminer.

Au final, le projet devrait fournir toutes les données nécessaires à l'évaluation du risque associé à ces phénomènes. La compréhension de ces phénomènes devrait également permettre de développer des outils de prévention et des moyens de protection pour réduire les risques de blessures graves et d'accidents mortels.

LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] H. H. Nguyen, "Une nouvelle approche pour structures periodiques- Application au calcul des vibrations d'un pneumatique," Mécanique des Matériaux et des Structures, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, 2008.
- [2] Michelin. L'essentiel du pneu [Online]. Available:
<http://www.michelin.com/corporate/front/templates/affich.jsp?codeRubrique=20060413172341&lang=FR>
- [3] Michelin. (2009, *Marchés du pneu* Available:
<http://www.michelin.com/corporate/front/templates/affich.jsp?codeRubrique=20060413172341&lang=FR>
- [4] Michelin. Marché mondial [Online]. Available:
<http://www.michelin.com/corporate/front/templates/affich.jsp?codeRubrique=20060413172341&lang=FR>
- [5] Michelin. *Qu'est-ce qu'un pneu ?* Available:
http://www.michelin.be/be/autofr/auto_cons_bib_qu_est_pne.jsp?lang=FR
- [6] Michelin. *Pneus neufs et réchapés* Available:
<http://français.michelintruck.com/michelintruck/tires-retreads/tireInfo.do?tread=XZA-1%2B>
- [7] R. Benoit, *et al.*, "Étude exploratoire sur les phénomènes d'éclatement et d'explosion de pneus de camions lourds," Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail, Montréal R-479, 2006.
- [8] Unipneu. Available: http://www.unipneu.com/fra/conseil/images/composante_fr.swf
- [9] Michelin. *Fabrication d'un pneu: pas de compromis.* Available:
<http://www.michelin.fr/pneus/decouvrir-partager/tout-sur-le-pneu/fabrication-pneus>
- [10] *Marquages de pneu.* Available: <http://www.nokiantires.com/marquages-du-pneu>
- [11] Michelin. *Informations de bases sur nos pneus.* Available:
<http://www.français.michelintruck.com/michelintruck/tires-retreads/tireBasics-landing.jsp>

- [12] Michelin. *Les composants du pneu*. Available:
http://www.michelin.com/corporate/front/templates/affich.jsp?codeRubrique=88&codePage=PAG_COMP_PNEU&lang=FR
- [13] J. L. Gabor, Wall, J.F., Rodgers, M. B., "Overview of medium radial truck and off the road tire technology " *paper presented at the Spring meeting, Rubber division, American Chemical Society, Providence, Rhode Island, 2001.*
- [14] C. Janin. (1999) Chimie et pneumatiques. *L'actualité chimique*.
- [15] École polytechnique de Montréal. Département de génie mécanique, *et al.*, *Plastiques, élastomères et composites : notes de cours : cours MEC3320*, 2002.
- [16] R. Musset, "Le caoutchouc synthétique," *Annales de Géographie*, vol. 65, 1956.
- [17] "Styrène butadiène," in *Wikipédia*, ed.
- [18] M. Gou, *et al.*, "Incidence de l'état mécanique des poids lourds sur la sécurité routière," *École Polytechnique de Montréal, pour la Société de l'assurance automobile du Québec*, décembre 1997.
- [19] Work Safe BC, "Welding on assembled wheel results in explosion," Vancouver2005.
- [20] T. Cutler, "Final Report to Hamersley Iron on Catastrophic Tyre Incident on Haultruck 06H1 at Channar on April 10, 2004," *OTRACO*, 2004.
- [21] OTRACO, "Tyre explosions: definitions, mechanisms, prevention, procedures," ed, 2002.
- [22] A. F. Hefny, *et al.*, "Severe tyre blast injuries during servicing," *Injury*, vol. 40, pp. 484-487, 2009.
- [23] D. D. o. I. a. Resources., "Tyre safety, fires and explosions — guideline: Safety and Health Division," p. 12, 2005.
- [24] P. I. Dolez, *et al.*, "Exploring the chemical aspects of truck tire blowouts and explosions," *Safety Science*, vol. 46, pp. 1334-1344, 2008.
- [25] A. Wineman, *et al.*, "Thermomechanics of elastomers undergoing scission and crosslinking at high temperatures," *Tire Science and Technology*, vol. 31, pp. 68-86, 2003.

- [26] H.-F. Tan, *et al.*, "Mechanical properties of cord-rubber composites and tire finite element analysis," 2004, pp. 161-174.
- [27] Y. T. Wei, *et al.*, "Experimental investigations on the dynamic mechanical properties of aged rubbers," *Polymer Testing*, vol. 23, pp. 447-453, 2004.
- [28] D. J. Burlett, "Thermal techniques to study complex elastomer/filler systems," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 75, pp. 531-544, 2004.
- [29] "Pyrolysis," in *Termium Plus*, ed.
- [30] J. Verdu, "Vieillissement des plastiques," *Association française de normalisation (AFNOR)*, 1984.
- [31] Available: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrolyse>
- [32] T. P. Wampler, *Applied pyrolysis handbook*, 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2007.
- [33] J. H. Chen, *et al.*, "On the pyrolysis kinetics of scrap automotive tires," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 84, pp. 43-55, 2001.
- [34] S. Seidelt, *et al.*, "Description of tire pyrolysis by thermal degradation behaviour of main components," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 75, pp. 11-18, 2006.
- [35] K. S. Chen, *et al.*, "Kinetics of thermal decomposition of styrene-butadiene rubber at low heating rates in nitrogen and oxygen," *Combustion and Flame*, vol. 108, pp. 408-418, 1997.
- [36] M. P. Mairesse, J.M., "Produits de dégradation thermique des matières plastiques.," pp. 47-57, 1999.
- [37] J. R. Kim, *et al.*, "Combustion characteristics of shredded waste tires in a fluidized bed combustor," *Energy*, vol. 19, pp. 845-854, 1994.
- [38] J. A. Conesa, *et al.*, "Kinetic model for the combustion of tyre wastes," *Fuel*, vol. 77, pp. 1469-1475, 1998.
- [39] M. Breault, "Un risque à connaître," *La revue sécurité incendie*, vol. 20, p. 2, 2004.
- [40] W. Glenn, "Exploding tires the hazard nobody's heard of," *Occupational Health and Safety Canada Magazine*, vol. 13, p. 7, 1997.

- [41] R. J. Grogan, "The investigator's guide to tire failures," p. 128, 1986.
- [42] A. L. A. Costa, *et al.*, "Tire bead overheating in urban buses and trucks using drum brake systems," *Tire Science and Technology*, vol. 26, pp. 51-62, 1998.
- [43] N. Jonassen, "Ions," *Compliance Engineering*, vol. 16, p. 5, 1999.
- [44] F. Buda, "Mécanismes cinétiques pour l'amélioration de la sécurité des procédés d'oxydation des hydrocarbures," Département de chimie physique des réactions, Institut National Polytechnique de Lorraine - Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques, Nancy, 2006.
- [45] ONRSA, "Tire explosions due to pyrolysis," 2006.
- [46] P. BEI, "Rapport d'expertise Pyrotech BEI (No. 003364)," 2002.
- [47] OTRACO, "Minimising the frequency and impact of tyre fires and explosions," 1997.
- [48] T. Rasche, "Tyre fires and explosions of earthmover tyres," *Australian Coal Association Research Program – ACARP*, p. 66, 2004
- [49] J. F. González, *et al.*, "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 58-59, pp. 667-683, 2001.
- [50] J. M. Lee, *et al.*, "Pyrolysis of waste tires with partial oxidation in a fluidized-bed reactor," *Energy*, vol. 20, pp. 969-976, 1995.
- [51] E. O. Bolarinva and O. A. Olatunbosun, "Finite element simulation of the tyre burst test," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D (Journal of Automobile Engineering)*, vol. 218, pp. 1251-8, 2004.
- [52] Y. Guan, *et al.*, "FEA and testing studies on static camber performance of the radial tire," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 26, pp. 1921-36, 2007.
- [53] E. Tonuk and Y. S. Unlusoy, "Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis," *Computers and Structures*, vol. 79, pp. 1219-1232, 2001.

- [54] H. Holscher, *et al.* Modeling of Pneumatic Tires by a Finite Element Model for the Development a Tire Friction Remote Sensor.
- [55] X. Yan, "Non-linear three-dimensional finite element modeling of radial tires," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 58, pp. 51-70, 2001.
- [56] X. Feng, *et al.*, "Analysis of extension propagation process of interface crack between belts of a radial tire using a finite element method," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 28, pp. 145-162, 2004.
- [57] K. Xia, "Finite element modeling of tire/terrain interaction: Application to predicting soil compaction and tire mobility," *Journal of Terramechanics*, vol. In Press, Corrected Proof.
- [58] X. Yan, *et al.*, "Study for the endurance of radial truck tires with finite element modeling," *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 59, pp. 471-488, 2002.
- [59] W. Hall, *et al.*, "Modelling of an automobile tyre using LS-DYNA3D."
- [60] Y. P. Chang, "Non linear FEA rotating tire modeling for transient response simulations," Department of mechanical engineering, The Pennsylvania State University, 2002.
- [61] N. T. Tseng, *et al.*, "Finite element simulation of destructive tire testing," *Tire Science and Technology*, vol. 19, pp. 2-22, 1991.
- [62] L. Jia, *et al.*, "Free vibration analysis of radial pneumatic tires using Bezier functions," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 285, pp. 887-903, 2005.
- [63] X. Y. Wei, *et al.*, "Numerical simulations of rock mass damage induced by underground explosion," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46, pp. 1206-1213, 2009.
- [64] C. Santanu. Challenges in the finite element analysis of the tire design using ABAQUS. Available: http://www.engineering-group.com/papers/aeg_featiredesign.pdf
- [65] J. R. DeEskinazi, R.A, "Finite element analysis of giant earthmover tires," *Rubber chemistry and technology*, 1982.
- [66] M. A. Ersahin, "Finite element analysis of cornering characteristics of rotating tires," Département de génie mécanique, The middle esat technical university, 2003.

- [67] M. Brinkmeier, *et al.*, "A finite element approach for the simulation of tire rolling noise," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 309, pp. 20-39, 2008.
- [68] K. T. Danielson, *et al.*, "Computational strategies for tire modeling and analysis," *Computers & Structures*, vol. 61, pp. 673-693, 1996.
- [69] C. W. Fervers, "Improved FEM simulation model for tire-soil interaction," *Journal of Terramechanics*, vol. 41, pp. 87-100.
- [70] I. Lopez, *et al.*, "Modelling vibrations on deformed rolling tyres--a modal approach," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 307, pp. 481-494, 2007.
- [71] H. Sameur, "Modèle de contact pneumatique/chaussée pour la prévision du bruit de roulement," *Mécanique des Matériaux et des Structures*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, 2004.
- [72] D. V. Wallerstein and G. A. Dilley, "Finite element analysis and the modeling of tires," 1983.
- [73] J. D. Reida, *et al.*, "Detailed tire modeling for crash applications," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 12, pp. 521-529, 2007.
- [74] Altair. (2009, *RADIOSS THEORY MANUAL 10.0 version – Large Displacement Finite Element Analysis*. Available: <http://ol.cadfamily.com/Hyperworks10/help/hwsolvers/hwsolvers.htm?rd3000.htm>
- [75] R. R. V. Neves, *et al.*, "An experimental and numerical investigation on tyre impact," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 37, pp. 685-693, 2010.
- [76] J. R. Cho, *et al.*, "Numerical investigation of tire standing wave using 3-D patterned tire model," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 305, pp. 795-807, 2007.
- [77] P. O. Naudin, K. Available: <http://www.urgence-pratique.com/2articles/medic/Blast.htm>
- [78] X. Yin, *et al.* Numerical analysis of blast loads inside buildings.
- [79] L. Yong and W. Zhongqi, "Characterization of structural effects from above-ground explosion using coupled numerical simulation," *Computers & Structures*, vol. 84, pp. 1729-42, 2006.

- [80] P. A. Urtiew and B. Hayes, "Parametric study of the dynamic JWL-EOS for detonation products," *Combustion, Explosion and Shock Waves*, vol. 27, pp. 505-514, 1992.
- [81] B. Langrand, *et al.*, "Submarine hull integrity under blast loading," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 1070-1078, 2009.
- [82] J. D. Campbell and R. D. Ervin, "Downsizing of heavy truck wheels due to extreme overinflation," Ann Arbor UMTRI-83-46, 1983.
- [83] D. o. s. police, "Need for Standards for Recapped Tires," 2000.
- [84] Goodyear. *Comment fabriquer un pneu. Construction de type radial* Available: http://www.goodyear.ca/tire_school/howtomake-fc.html
- [85] R. Benoit, *et al.*, "L'éclatement et l'explosion des pneus de véhicules lourds," IRSST, Montreal R-568, 2008.
- [86] L. P. Kollar and G. S. Springer, *Mechanics of composite structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [87] Laboratoire de mécanique des sols, structures et matériaux. Brève description des méthodes implicites et explicites [Online]. Available: <http://www.mssmat.ecp.fr/Breve-description-des-methodes,890>

ANNEXE 1 – Indices de charge et de vitesse d'un pneu

Indice de charge	Poids (kg)	Indice de charge	Poids (kg)	Indice de charge	Poids (kg)	Indice de charge	Poids (kg)
20	80	55	218	79	437	101	825
22	85	58	236	80	450	102	850
24	85	59	243	81	462	103	875
26	90	60	250	82	475	104	900
28	100	61	257	83	487	105	925
30	106	62	265	84	500	106	950
31	109	63	272	85	515	107	975
33	115	64	280	86	530	108	1000
35	121	65	290	87	545	109	1030
37	128	66	300	88	560	110	1060
40	136	67	307	89	580	111	1090
41	145	68	315	90	600	112	1120
42	150	69	325	91	615	113	1150
44	160	70	335	92	630	114	1180
46	170	71	345	93	650	115	1215
47	175	72	355	94	670	116	1250
48	180	73	365	95	690	117	1285
50	190	74	375	96	710	118	1320
51	195	75	387	97	730	119	1360
52	200	76	400	98	750	120	1400
53	206	77	412	99	775		
54	212	78	425	100	800		

Indice de vitesse	Vitesse (km/h)	Indice de vitesse	Vitesse (km/h)	Indice de vitesse	Vitesse (km/h)
A1	5	D	65	Q	160
A2	10	E	70	R	170
A3	15	F	80	S	180
A4	20	G	90	T	190
A5	25	J	100	U	200
A6	30	K	110	H	210
A7	35	L	120	V	240
A8	40	M	130	ZR	>240
B	50	N	140	W	270
C	60	P	150	Y	300

ANNEXE 2 – Accidents du travail causés par une explosion ou un éclatement de pneu survenus au Québec entre 1990 et 2004

Date	Conséquences	Description	Cause	Type véhicule	Type de pneu	Type de lieu	Notes
7-7-90	1 décès	Explosion à l'intérieur d'un pneu qui, en se déjantant frappe, le réparateur	Soudure d'une jante détériorée avec pneu gonflé	Roue de camion indéterminé	indéterminé	G	Utilisation de produit inflammable pour faciliter l'installation du pneu. Une jante détériorée est surchauffée lors de la soudure de la jante. Les gaz produits par la combustion de la graisse enduite sur la jante ont explosé sous l'effet de la chaleur du soudage.
3-7-91	1 décès	Éjection subite des roues d'un chariot élévateur lors d'un remplacement de pneus	Explosion de la jante due à une fissure	Chariot élévateur Taylor Model TYTC 1100L Capacité 55 T	indéterminé	A	Présence d'une fissure d'origine inconnue dans la jante. Le travailleur n'a pas vu cette fissure
31-7-95	Blessures graves aux yeux	Éclatement d'un pneu sur l'essieu arrière du côté intérieur d'une remorque de sciure de bois	Surchauffe du pneu à cause d'une fuite d'air du système de freinage. Apparition d'une petite flamme visible sur l'intérieur du tambour de frein.	Remorque tritandem	non mentionné	R	Un cas typique de surchauffe entraînant une explosion à la suite d'une dégradation importante du caoutchouc par réaction chimique (pyrolyse ou thermo-oxydation) suivie d'une rupture brutale du pneu possiblement combinée à une déformation de la jante
10-2-94	1 décès	Éclatement du flanc d'un pneu arrière de remorque	vraisemblablement dû à une surchauffe du système de frein	Mack avec remorque pour le bois	Michelin X 11R 24.5 XYZ	R	Pneu surchauffé par le système de freinage. Dégradation du pneu et rupture brutale du flanc. Pneu déchiré sur la surface interne et pas de trace d'autre dégradation
4-6-96	1 décès	Travailleur frappé par la projection d'un pneu lors d'une réparation de la jante (soudure)	Déformation de la jante et projection du pneu à la suite d'une explosion causée par l'effet de la soudure avec un pneu gonflé	Camion lourd indéterminé	indéterminé	G	Lors de la soudure, il y a eu échauffement important du pneu. Vraisemblablement déformation de la jante à cause de l'explosion et du déjantement du pneu suivie de la projection du pneu jusqu'au plafond
10-10-96	dommages matériels	Incendie localisé aux pneus arrières d'un camion minier qui fait exploser le pneu intérieur gauche après un certain temps	Incendie provoqué par une fuite d'huile et la chaleur d'un frein défectueux	Camion transport minier Titan Modèle 2200 à benne	Bridgestone V Steel R Lug 3700 R57 et Goodyear Unisteel E4 type 4H	M	Le pneu s'est enflammé à cause d'un carburant qui se serait répandu. La mise à feu est causée par la chaleur dégagée par la friction de composantes (étriers) brisées du frein. Sous l'effet des flammes externes, fusion et carbonisation du caoutchouc jusqu'à T> T vulcanisation
21-9-98	1 décès	Conducteur frappé par l'explosion d'un pneu du côté passager à l'arrière du	Les faisceaux électriques surchauffent des câbles sur le châssis et les flammes se	Tracteur routier 10 roues Mack modèle 800 pour le transport du	Michelin XMP 170E	R	Dégradation du pneu à la suite d'un incendie provoqué par une cause externe (faisceaux électriques sur un longeron). Le lien avec pyrolyse n'est pas évident. Caoutchouc fondu

		camion	propagent au pneu.	bois			et brûlé, carcasse déchirée, explosion du pneu suite à l'incendie (cause externe).
24-6-99	1 décès	Rupture éclair lors du gonflage d'un pneu radial déjà dégradé après une réparation antérieure	Rupture éclair du flanc du pneu	Camion à benne	Dunlop de bas de gamme	G	Rupture éclair en lien avec un pneu ayant roulé en souspression ou en surcharge.
3-7-01	1 décès	Travailleur frappé à la tête, projection de la jante, lors du gonflage d'un pneu de remplacement à la suite de l'explosion du pneu initial	Jante de roue en alliage d'aluminium déformée par la chaleur intense	Tracteur routier Navistar International 1994	Michelin XZA2 et Yokohama TY517	G	La surchauffe des freins a provoqué l'explosion de 2 pneus et endommagé la jante. Lors du remplacement d'un des 2 pneus, il y a eu projection de la jante au moment du gonflage. Perte des propriétés mécaniques de l'aluminium si $T^{\circ} > 315^{\circ}C$ et suite au roulement sur pneu
27-9-02	1 décès + 2 blessés	Un pneu du 1er essieu de traction coté intérieur sur un tracteur 10 roues, explose au visage du camionneur lorsqu'il tente de réparer un récepteur de freinage. Transport de bois.	Échauffement du pneu via la surchauffe du tambour de frein	Tracteur Kenworth, ARTIS 1998	Michelin Radial Tubeless	R	Il y aurait eu début de pyrolyse selon le rapport des experts. Rapport d'expertise détaillé.
2-4-04	1 décès	La tête du camionneur est projetée sur le différentiel du tracteur par le souffle de l'explosion du pneu	Échauffement du pneu via la surchauffe du tambour de frein. Frein de stationnement bloqué, fuite d'air du récepteur de freinage	International Modèle 9400, 2000, 10 roues	Michelin Radial XZA-1, LRG Tubeless 11 R22.5	R	Accident similaire à Réf. 3364. Réaction chimique possible: pyrolyse ou thermo-oxydation à l'intérieur de la roue intérieure arrière gauche

Type de lieu : route (R), garage (G), mine (M), autre (A)

ANNEXE 3 – Mécanique des composites [86]

Monocouche orthotrope

Selon la loi de Hooke, la relation contrainte-déformation s'écrit

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

avec :

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Monocouche orthotrope orientée à un angle θ

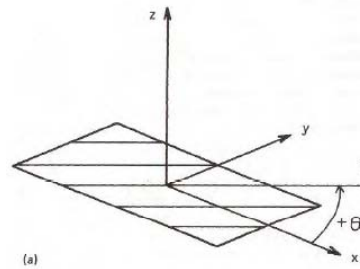
Pour une monocouche orientée à un angle θ , on définit les axes de chargement et du matériau comme suit :

x, y : les axes du chargement,

1 : la direction longitudinale des fibres

2 : la direction transversale des fibres

θ : l'angle d'orientation des fibres.



La matrice de transformation des contraintes $[T_\sigma]$:

$$[T_\sigma] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \text{ avec } m = \cos \theta \text{ et } n = \sin \theta \quad (\text{A.3})$$

permet de relier les contraintes dans les deux systèmes d'axes :

$$[\sigma]_{1-2} = [T_\sigma][\sigma]_{x-y} \quad (\text{A.4})$$

En ce qui concerne les déformations, le passage entre les deux systèmes d'axes se fait par l'intermédiaire de la matrice de transformation des déformations $[T_\varepsilon]$

$$[T_\varepsilon] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \text{ avec } m = \cos \theta \text{ et } n = \sin \theta \quad (\text{A.5})$$

(La matrice de transformation des déformations s'applique à des déformations nominales et par conséquent n'est pas identique à la matrice de transformation des contraintes)

$$[\varepsilon]_{1-2} = [T_\varepsilon][\varepsilon]_{x-y} \quad (\text{A.6})$$

Dans le système d'axes 1,2; nous avons :

$$[\sigma]_{1-2} = [Q][\varepsilon]_{1-2} \quad (\text{A.7})$$

On substitue alors les valeurs de $[\sigma]_{1-2}$ et $[\varepsilon]_{1-2}$ en fonction de $[T_\sigma]$ et $[T_\varepsilon]$ trouvées précédemment :

$$[T_\sigma][\sigma]_{x-y} = [Q][\varepsilon]_{1-2} = [Q][T_\varepsilon][\varepsilon]_{x-y} \quad (\text{A.8})$$

$$[\sigma]_{x-y} = ([T_\sigma]^{-1}[Q][T_\varepsilon])[\varepsilon]_{x-y} \quad (\text{A.9})$$

Posons :

$$[\bar{Q}] = [T_\sigma]^{-1}[Q][T_\varepsilon] \quad (\text{A.10})$$

Dans le système d'axes x et y correspondant aux axes du chargement, la relation contraintes-déformations s'écrit en fonction de $[\bar{Q}]$:

$$[\sigma]_{x-y} = [\bar{Q}][\varepsilon]_{x-y} \quad (\text{A.11})$$

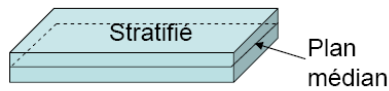
Théorie des stratifiés

Les déformations du stratifié sont liées linéairement à la déformation du plan médian :

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^0 + zk_{xx} \quad (\text{A.12})$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{yy}^0 + zk_{yy} \quad (\text{A.13})$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 + zk_{xy} \quad (\text{A.14})$$



où $\varepsilon_{xx}^0, \varepsilon_{yy}^0$: déformations normales du plan médian du stratifié

γ_{xy}^0 : distorsion du plan médian du stratifié

Pour la couche j, les déformations sont donc données par :

$$[\varepsilon]_j = [\varepsilon^0] + z[k] \quad (\text{A.15})$$

Puisque l'équation (A.15) donne les déformations à n'importe quelle distance du plan médian, les contraintes selon l'axe arbitraire xy dans la couche j du stratifié peuvent être déterminées en substituant l'équation (A.15) dans la relation contrainte-déformation de la couche j :

$$[\sigma]_j = [\bar{Q}]_j [\varepsilon]_j \quad (\text{A.16})$$

$$[\sigma]_j = [\bar{Q}]_j ([\varepsilon^0] + z[k]) = [\bar{Q}]_j [\varepsilon^0] + [\bar{Q}]_j [k]z \quad (\text{A.17})$$

Les forces et moments par unité de largeur sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{zz} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} dz \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{zz} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} z dz \quad (\text{A.19})$$

Ces forces et moments peuvent se réécrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} [N] &= \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j [\varepsilon^0] dz + \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j [k] z dz = \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j dz \right\} [\varepsilon^0] + \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j z dz \right\} [k] \\ [M] &= \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j [\varepsilon^0] z dz + \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j [k] z^2 dz \\ &= \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j z dz \right\} [\varepsilon^0] + \left\{ \int_{-h/2}^{h/2} [\bar{Q}]_j z^2 dz \right\} [k] \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

En posant :

$$[A] = \sum_{j=1}^N \left\{ [\bar{Q}]_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} dz \right\} = \sum_{j=1}^N [\bar{Q}]_j (h_j - h_{j-1}) \quad (\text{A.21})$$

$$[B] = \sum_{j=1}^N \left\{ [\bar{Q}]_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} z dz \right\} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N [\bar{Q}]_j (h_j^2 - h_{j-1}^2) \quad (\text{A.22})$$

$$[D] = \sum_{j=1}^N \left\{ [\bar{Q}]_j \int_{h_{j-1}}^{h_j} z^2 dz \right\} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N [\bar{Q}]_j (h_j^3 - h_{j-1}^3) \quad (\text{A.23})$$

On obtient les relations :

$$[N] = [A][\varepsilon^0] + [B][k] \quad (\text{A.24})$$

$$[M] = [B][\varepsilon^0] + [D][k] \quad (\text{A.25})$$

soit :

$$\begin{bmatrix} \{\mathbf{N}\} \\ \{\mathbf{M}\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}] & [\mathbf{B}] \\ [\mathbf{B}] & [\mathbf{D}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{\mathbf{k}\} \end{bmatrix} \quad (\text{A.26})$$

ANNEXE 4 – Calcul des propriétés mécaniques d'un stratifié

Composition du stratifié

Le stratifié (figure a-1) se compose des couches suivantes :

- une « couche élémentaire » (1) d'épaisseur 0,6 mm et orientée à $+20^\circ$
- une couche de caoutchouc (2) d'épaisseur 0,6 mm
- une « couche élémentaire » (3) d'épaisseur 0,6 mm et orientée à -20°

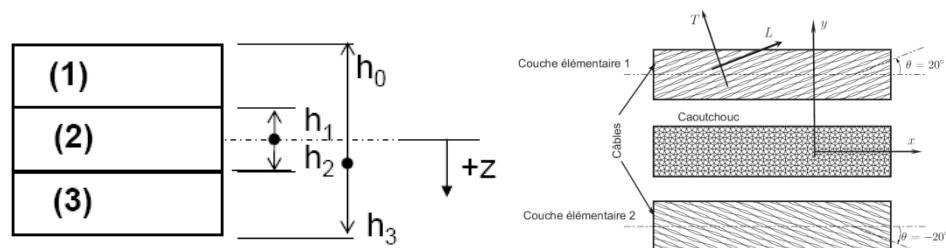


Figure A-1 Composition du stratifié

Les longueurs h_0 , h_1 , h_2 et h_3 prennent les valeurs suivantes :

$h_0 = -0,9$ mm, $h_1 = -0,3$ mm, $h_2 = 0,3$ mm et $h_3 = 0,9$ mm

Couche de caoutchouc (2)

Propriétés du caoutchouc

Pour les calculs qui suivent, on considère le caoutchouc comme élastique isotrope avec les propriétés mécaniques suivantes [1]:

Tableau A-1 Propriétés mécaniques du caoutchouc

E (Mpa)	ν
7	0,49

D'après la loi de Hooke, $[\sigma] = [Q]_{(2)}[\varepsilon]$ avec :

$$[Q]_{(2)} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,2117 & 4,5138 & 0 \\ 4,5138 & 9,2117 & 0 \\ 0 & 0 & 2,3490 \end{bmatrix} (Mpa)$$

où $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ et $[Q]$ est la matrice de rigidité.

(L'indice (i) fait référence à la couche i)

Couche élémentaire (1)

Propriétés de la couche élémentaire

Les propriétés mécaniques de la couche élémentaire sont connues dans les directions longitudinale et transversale des fibres :

Tableau A-2 Propriétés mécaniques de la couche élémentaire dans le repère d'axes 1,2

E₁ (MPa)	E₂ (MPa)	ν_{12}	G₁₂ (MPa)
33748	9	0,47	4,5

Ainsi,

$$[Q]_{(1)} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33750 & 4,23 & 0 \\ 4,23 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 4,5 \end{bmatrix} (MPa)$$

Avec $\nu_{21} = (E_2/E_1) \nu_{12}$

Cette couche étant orientée à $+20^\circ$, la matrice de transformation des contraintes s'écrit :

$$[T_\sigma]_{20^\circ} = \begin{bmatrix} \cos^2(20) & \sin^2(20) & 2 \sin(20) \cos(20) \\ \sin^2(20) & \cos^2(20) & -2 \sin(20) \cos(20) \\ -\sin(20) \cos(20) & \sin(20) \cos(20) & \cos^2(20) - \sin^2(20) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0,8830 & 0,1170 & 0,6428 \\ 0,1170 & 0,8830 & -0,6428 \\ -0,3214 & 0,3214 & 0,7660 \end{bmatrix}$$

$$[T_\varepsilon]_{20^\circ} = \begin{bmatrix} \cos^2(20) & \sin^2(20) & \sin(20) \cos(20) \\ \sin^2(20) & \cos^2(20) & -\sin(20) \cos(20) \\ -2 \sin(20) \cos(20) & 2 \sin(20) \cos(20) & \cos^2(20) - \sin^2(20) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 0,8830 & 0,1170 & 0,3214 \\ 0,1170 & 0,8830 & -0,3214 \\ -0,6428 & 0,6428 & 0,7660 \end{bmatrix}$$

On en déduit $[\bar{Q}]_{(1)}$ à partir de :

$$[\bar{Q}]_{(1)} = [T_\sigma]_{20^\circ}^{-1} [Q]_{(1)} [T_\varepsilon]_{20^\circ}$$

$$[\bar{Q}]_{(1)} = \begin{bmatrix} 26319 & 3489 & 9575 \\ 3489 & 472 & 1270 \\ 9575 & 1270 & 3489 \end{bmatrix} (Mpa)$$

Couche élémentaire (3)

On procède de la même manière pour la couche (3).

$$[Q]_{(3)} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33750 & 4,23 & 0 \\ 4,23 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 4,5 \end{bmatrix} (MPa)$$

La couche (3) est orientée à -20° donc :

$$[\bar{Q}]_{(3)} = [T_\sigma]_{-20^\circ}^{-1} [Q]_{(3)} [T_\varepsilon]_{-20^\circ}$$

$$[\bar{Q}]_{(3)} = \begin{bmatrix} 26319 & 3489 & -9575 \\ 3489 & 472 & -1270 \\ -9575 & -1270 & 3489 \end{bmatrix} (MPa)$$

Propriétés mécaniques du stratifié

La relation $\begin{bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{k\} \end{bmatrix}$ peut être déterminée pour le stratifié à partir des matrices

$[\bar{Q}]_{(1)}$, $[\bar{Q}]_{(2)}$, $[\bar{Q}]_{(3)}$ et des dimensions h_0 , h_1 , h_2 et h_3 .

En effet,

$$[A] = \sum_{j=1}^3 [\bar{Q}]_j (h_j - h_{j-1}) = [\bar{Q}]_{(1)}(h_1 - h_0) + [\bar{Q}]_{(2)}(h_2 - h_1) + [\bar{Q}]_{(3)}(h_3 - h_2)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 31588 & 4189 & 0 \\ 4189 & 571 & 0 \\ 0 & 0 & 4188 \end{bmatrix} (N \cdot mm^{-1})$$

$$\begin{aligned}
[B] &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 [\bar{Q}]_j (h_j^2 - h_{j-1}^2) \\
&= \frac{1}{2} [\bar{Q}]_{(1)} (h_1^2 - h_0^2) + \frac{1}{2} [\bar{Q}]_{(2)} (h_2^2 - h_1^2) + \frac{1}{2} [\bar{Q}]_{(3)} (h_3^2 - h_2^2)
\end{aligned}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{6894} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{914} \\ -\mathbf{6894} & -\mathbf{914} & \mathbf{0} \end{bmatrix} (N)$$

$$\begin{aligned}
[D] &= \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 [\bar{Q}]_j (h_j^3 - h_{j-1}^3) = \frac{1}{3} [\bar{Q}]_{(1)} (h_1^3 - h_0^3) + \frac{1}{3} [\bar{Q}]_{(2)} (h_2^3 - h_1^3) \\
&\quad + \frac{1}{3} [\bar{Q}]_{(3)} (h_3^3 - h_2^3)
\end{aligned}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \mathbf{12317} & \mathbf{1633} & \mathbf{0} \\ \mathbf{1633} & \mathbf{221} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1633} \end{bmatrix} (N.mm)$$

Finalement,

$$\begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{zz} \\ M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{31588} & \mathbf{4189} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{6894} \\ \mathbf{4189} & \mathbf{571} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{914} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{4188} & -\mathbf{6894} & -\mathbf{914} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{6894} & \mathbf{12317} & \mathbf{1633} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\mathbf{914} & \mathbf{1633} & \mathbf{221} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{6894} & -\mathbf{914} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1633} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix}$$

Dans le cas d'un stratifié soumis à un effort de traction, les composantes du vecteur $\{M\}$ (moments par unité de largeur) sont nulles.

En écrivant $\{M\} = \{0\}$ dans l'équation fondamentale des stratifiés :

$$\begin{bmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{k\} \end{bmatrix}$$

On obtient :

$$\{0\} = [B]\{\varepsilon^0\} + [D]\{k\} \quad (\text{A.27})$$

Le vecteur $\{K\}$ peut s'exprimer en fonction du vecteur $\{\varepsilon^0\}$:

$$\{k\} = -[D]^{-1}[B]\{\varepsilon^0\} \quad (\text{A.28})$$

On en déduit l'équation:

$$\{N\} = ([A] - [B][D]^{-1}[B])\{\varepsilon^0\} \quad (\text{A.29})$$

En posant

$$[A^*] = [A] - [B][D]^{-1}[B] \quad (\text{A.30})$$

On a finalement :

$$\{N\} = [A^*]\{\varepsilon^0\} \quad (\text{A.31})$$

Les modules et les coefficients de Poisson apparents du stratifiés peuvent alors être calculés selon le système d'axes x, y à l'aide des formules suivantes :

$$E_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}^0} = \frac{A_{11}^* A_{22}^* - A_{12}^{*2}}{h A_{22}^*} \quad (\text{A.32})$$

$$E_{yy} = \frac{\sigma_{yy}}{\varepsilon_{yy}^0} = \frac{A_{11}^* A_{22}^* - A_{12}^{*2}}{h A_{11}^*} \quad (\text{A.33})$$

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_{yy}^0}{\varepsilon_{xx}^0} = \frac{A_{12}^*}{A_{22}^*} \quad (\text{A.34})$$

$$\nu_{yx} = \nu_{xy} \frac{E_{yy}}{E_{xx}} = \frac{A_{12}^*}{A_{11}^*} \quad (\text{A.35})$$

$$G_{xy} = \frac{A_{66}^*}{h} \quad (\text{A.36})$$

h : épaisseur du stratifié (h = 1,8 mm)

Ici,

$$[A^*] = \begin{bmatrix} 2483,3 & 329,8 & 0 \\ 329,8 & 59,7 & 0 \\ 0 & 0 & 329,8 \end{bmatrix} (N.mm^{-1})$$

Les calculs donnent les valeurs suivantes :

E_{xx} (Mpa)	E_{yy} (Mpa)	ν_{yx}	G_{xy} (Mpa)
367,4	8,9	0,133	183,2

Tableau A-3 Propriétés mécaniques du stratifié dans le système d'axes x, y

ANNEXE 5 – Schémas explicite et implicite

Une explosion est un phénomène complexe qui requiert des techniques de simulation adaptées. Les méthodes de simulation classiques utilisant un schéma implicite ne suffisent pas à résoudre des problèmes d'une si courte durée de façon précise. Il est alors nécessaire de recourir à un logiciel utilisant un schéma explicite tel que Radioss.

Pour comprendre l'intérêt de la méthode explicite, il est essentiel de savoir différencier les méthodes explicite et implicite.

Le choix entre les schémas explicite et implicite dépend principalement du degré de non linéarité et de la vitesse du phénomène simulé.

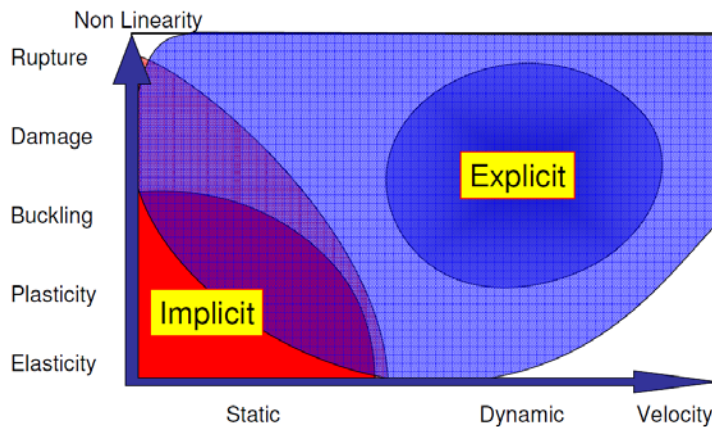


Figure A-2 Domaines d'application des schémas implicite et explicite

(d'après le manuel Altair « Radioss for impact analysis - Explicit large displacement analysis »)

Le qualificatif d'implicite ou d'explicite se rapporte au schéma d'intégration par rapport au temps (figure a-4).

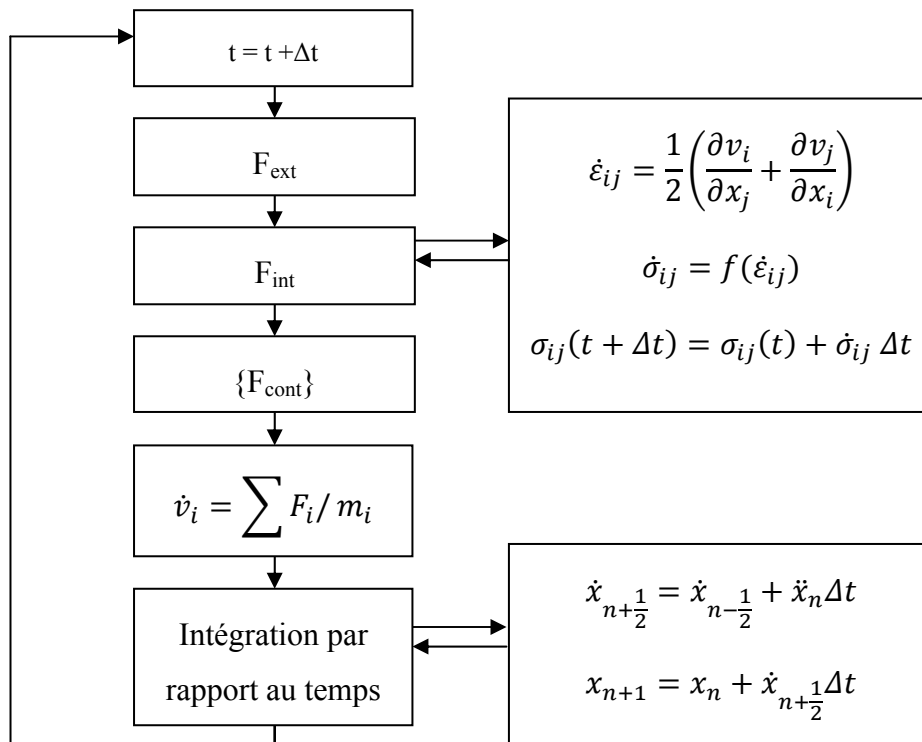


Figure A-3 Méthode d'intégration du schéma explicite (d'après le manuel Altair « Radioss for impact analysis - Explicit large displacement analysis »)

L'intégration par rapport au temps utilise la méthode de différence centrée.

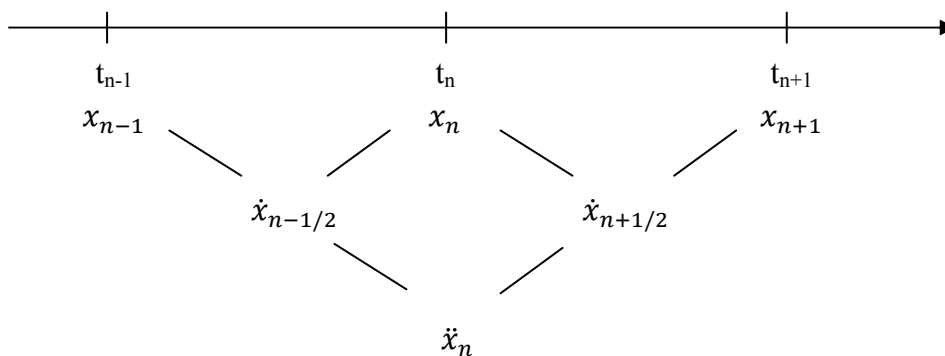


Figure A-4 Intégration par rapport au temps

« Pour les méthodes de résolution implicites, on cherche à chaque pas de temps une solution en déplacement et en vitesse vérifiant le principe des puissances virtuelles. La présence de non-linéarités dans le problème oblige à une recherche itérative de cette solution.

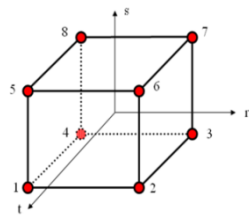
Les méthodes de résolution s'appuyant sur un schéma d'intégration explicite en temps expriment l'accélération à la fin du pas de temps en fonction de la solution (déplacements, vitesses et accélérations) au pas de temps précédent. La détermination de la solution à la fin du pas de temps repose donc sur la résolution de l'équation linéaire déterminant cette accélération. Cette résolution est rendue très rapide par la diagonalisation de la matrice de masse » [87]. La solution à chaque pas de temps peut être obtenue en inversant la matrice de masse diagonalisée. Si des itérations ne sont pas nécessaires pour obtenir un équilibre (comme c'est par exemple le cas avec les méthodes implicites), une condition concernant l'amplitude du pas de temps est nécessaire pour assurer la stabilité. En effet, la stabilité est assurée « si le pas de temps est plus petit que le temps nécessaire à une onde de compression pour traverser le plus petit élément fini de la structure » [87].

Le pas de temps stable s'écrit alors:

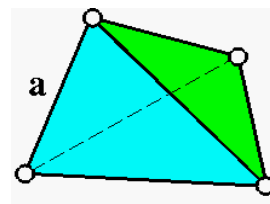
$$\Delta t = \min_{\text{éléments}} \left(\frac{l}{c} \right) \quad (4.7)$$

- l est la longueur caractéristique de l'élément
- c est la vitesse du son dans le matériau

Voici à titre d'exemple les longueurs caractéristiques de quelques éléments :



$$l_c = \frac{\text{volume}}{\text{aire de la plus grande face}}$$



$$l_c = a \sqrt{\frac{2}{3}} = 0,816 a$$

Figure A-5 Longueurs caractéristiques d'éléments hexaédrique et tétraédrique

Les avantages et inconvénients des deux méthodes de résolution sont énumérés dans le tableau a-.

Tableau A-4 Avantages et inconvénients des schémas implicite et explicite

Explicite	Implicite
(-) Stabilité conditionnelle $\Delta t < \Delta t_c$	(+) Toujours stable
(-) Pas de temps faible Δt (μs)	(+) Pas de temps élevé Δt (ms)
(+) Précision $\theta \approx (\Delta t)^2$	(+) Précision $\theta \approx (\Delta t)^2$
(+) $[M]^{-1}$ matrice diagonale	(-) $([M] + \alpha [K])^{-1}$ matrice non diagonale
(+) Faible mémoire	(-) Mémoire élevée
(+) Dynamique et problèmes d'impact	(+) Dynamique et problèmes statiques
(+) Méthode « élément par élément » Traitement local	(+) Résolution globale Convergence nécessaire à chaque pas
(+) Grande robustesse Non linéarités couplées	(+) Faible robustesse Divergence
(+) Relativement peu coûteux CPU « faible », mémoire « faible »	(+) Trop coûteux CPU élevé, mémoire élevée

